



**Universidad
Católica
de Valencia**
San Vicente Mártir

PROGRAMA DE DOCTORADO DE CIENCIAS DE LA SALUD

**LA VARIABILIDAD DE LA FRECUENCIA
CARDÍACA COMO INDICADOR DE FATIGA EN
EL FÚTBOL PROFESIONAL**

Tesis Doctoral presentada por:

Francisco Javier Forner Llácer

Para la obtención del Grado de Doctor por la Universitat Catòlica de Valencia

Valencia, 7 de enero de 2021

Dirigida por:

Eduardo Nagore Enguítanos, Rafael Aranda Malavés.

ÍNDICE

1. Introducción.....	1
1.1. Variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV).....	1
1.1.1. Delimitación conceptual.....	1
1.1.2. Sistema nervioso humano. Sistema nervioso autónomo (SNA).....	2
1.1.3. Uso de la HRV en el campo de la medicina.....	6
1.1.4. Uso de la HRV en el campo del deporte.....	8
1.1.4.1. Uso de la HRV en función del nivel de entrenamiento.....	9
1.1.4.2. Uso de la HRV con objetivos deportivos.....	11
1.1.4.3. HRV en el campo del deporte amateur.....	16
1.1.4.4. HRV en el campo del deporte profesional.....	18
1.1.4.4.1. Deportes individuales.....	18
1.1.4.4.2. Fútbol profesional.....	21
1.1.4.4.3. Fútbol en jóvenes.....	26
1.1.4.4.4. Fútbol femenino.....	26
1.1.5. Protocolos de registro de la HRV.....	27
1.1.5.1. Cuándo realizar los registros de la HRV.....	29
1.1.5.1.1. HRV en reposo.....	29
1.1.5.1.2. HRV durante el ejercicio físico.....	31
1.1.5.1.3. HRV post ejercicio.....	32
1.1.5.2. Posición durante el registro de la HRV.....	33
1.1.5.3. Duración del registro y del tiempo de estabilización.....	34
1.1.6. Métodos de análisis de la HRV.....	38
1.1.6.1. Métodos basados en el dominio de tiempo.....	39
1.1.6.2. Métodos basados en el dominio de frecuencias.....	40
1.1.6.3. Métodos no lineales.....	42
1.1.7. Interpretación de diferentes parámetros de HRV y frecuencia cardíaca...43	
1.2. Carga de entrenamiento en fútbol.....	51
1.2.1. Carga interna.....	52
1.2.1.1. Frecuencia Cardíaca.....	53
1.2.1.1.1. TRIMP de Banister.....	53
1.2.1.1.2. TRIMP de Edwards.....	54

1.2.1.2.	Escala de percepción subjetiva de esfuerzo (RPE).....	54
1.2.2.	Carga externa.....	56
1.2.2.1.	GPS.....	56
1.3.	La fatiga en el fútbol.....	57
1.3.1.	Definición.....	57
1.3.2.	Tipos de fatiga.....	58
1.3.3.	Fases de la fatiga.....	60
1.3.4.	Causas de la fatiga.....	60
1.3.5.	Marcadores de fatiga.....	64
1.3.5.1.	HRV en fútbol.....	64
1.3.5.2.	Escala de percepción subjetiva de bienestar.....	64
2.	Objetivos.....	67
3.	Material y método.....	69
3.1.	Muestra.....	69
3.2.	Diseño de la investigación.....	71
3.3.	Variables.....	71
3.3.1.	Tipo de día HRV.....	72
3.3.2.	HRV.....	73
3.3.3.	Carga de entrenamiento subjetiva.....	74
3.3.4.	Escala de percepción subjetiva de bienestar.....	75
3.4.	Procedimiento.....	76
3.4.1.	Registro de datos.....	76
3.5.	Análisis estadístico.....	78
4.	Resultados.....	81
4.1.	Tiempo mínimo de estabilización necesario en las mediciones ultra-cortas de HRV en futbolistas profesionales.....	81
4.2.	RPE y parámetros de bienestar (sueño, fatiga y estado muscular) en los diferentes tipos de día del microciclo.....	84
4.3.	Valores de RMSSD en cada tipo de día del microciclo.....	89
4.4.	Relación entre RMSSD, percepción subjetiva de esfuerzo y variables del cuestionario de bienestar (fatiga, sueño y estado muscular).....	91
5.	Discusión.....	93
5.1.	Validez de registros ultra-cortos de HRV.....	93

5.2. Escala de percepción subjetiva de esfuerzo según el tipo de día del microciclo.....	97
5.3. Nivel de fatiga según el tipo de día del microciclo.....	100
5.4. Calidad del sueño según el tipo de día del microciclo.....	101
5.5. Estado muscular según el tipo de día del microciclo.....	102
5.6. Valores de RMSSD en cada tipo de día del microciclo.....	103
5.7. Relación entre RMSSD, percepción subjetiva de esfuerzo, fatiga, sueño y estado muscular.....	106
5.8. Fortalezas y limitaciones.....	109
5.9. Aplicaciones prácticas.....	109
6. Conclusiones.....	111
7. Referencias bibliográficas.....	113
8. Anexos.....	133
8.1. Consentimiento informado del jugador para utilización de datos.....	133
8.2. Ejemplar para el jugador.....	134
8.3. Ejemplar para el jugador.....	136

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ejemplo de la variación de tiempo entre ondas RR para determinar la variabilidad de la frecuencia cardíaca.....	1
Figura 2: Sistema nervioso central.....	3
Figura 3: Sistema nervioso autónomo (simpático y parasimpático).....	5
Figura 4: Ejemplo de un informe de análisis de un período concreto de tiempo de un archivo RR con el método de tiempo.....	40
Figura 5: Ejemplo de un informe de análisis de un período concreto de tiempo de un archivo RR con el método de frecuencias.....	42
Figura 6: Ejemplo de un informe de análisis de un período concreto de tiempo de un archivo RR con el método no lineal.....	43
Figura 7: Ejemplo de parámetros obtenidos con el método de análisis de dominio de tiempo de un archivo RR sin aplicar filtro para corregir los artefactos.....	44
Figura 8: Ejemplo de parámetros obtenidos con el método de análisis de dominio de tiempo de un archivo RR aplicando un filtro medio para corregir los artefactos.....	44
Figura 9: Ejemplo de parámetros obtenidos con el método de análisis de dominio de tiempo de un archivo RR aplicando un filtro fuerte para corregir los artefactos.....	45
Figura 10: Ejemplo de la variación de RMSSD durante una temporada de un futbolista profesional.....	50
Figura 11: Principales instrumentos para medir la fatiga psicológica y fisiológica en fútbol.....	66
Figura 12: Tipos de día de un microciclo competitivo.....	73
Figura 13: Valores de RMSSD a partir de diferentes intervalos de tiempo.....	74
Figura 14: Escala de percepción subjetiva de esfuerzo (RPE).....	75
Figura 15: Escala de percepción subjetiva de bienestar.....	76
Figura 16: Protocolo diario de toma de datos.....	77
Figura 17: Gráfico de Bland-Altman del LnRMSSD de cada intervalo de 1 minuto con diferentes tiempos previos de estabilización con el LnRMSSD del período referencia-criterio.....	84
Figura 18: Diferencias en la escala de percepción subjetiva de esfuerzo según el tipo de día.....	85

Figura 19. Diferencias en la percepción subjetiva del nivel de fatiga según el tipo de día.....	87
Figura 20. Diferencias en la percepción subjetiva del estado muscular según el tipo de día.	89
Figura 21. Diferencias en el valor de RMSSD según el tipo de día.....	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Interpretación de los cambios de RMSSD y frecuencia cardíaca.....	47
Tabla 2: Interpretación práctica de diferentes combinaciones de valores de RMSSD _{semanal} en relación con su CV _{semanal}	49
Tabla 3: Parámetros e instrumentos para medir la carga interna y externa.....	52
Tabla 4: TRIMP de Edwards.	54
Tabla 5: Características de la muestra del estudio.....	69
Tabla 6: N de las distintas variables analizadas según el día.....	70
Tabla 7: Valores de RMSSD de los primeros intervalos de 1 minuto y del período referencia-criterio de 5 minutos.....	82
Tabla 8: Correlación entre RMSSD de cada intervalo de 1 minuto y RMSSD del período referencia-criterio.....	83
Tabla 9: Coeficiente de correlación de Spearman entre RMSSD, RPE, calidad del sueño, nivel de fatiga y estado muscular.....	91

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

CMJ: salto con contra movimiento (*counter movement jump*).

CMS: cambio mínimo significativo (*smallest worthwhile change*)

CV: coeficiente de variación.

CVRMSSD: coeficiente de variación de RMSSD.

ECG: electrocardiograma.

FC: frecuencia cardíaca.

GPS: sistema posicionamiento global (*global positioning system*).

HF: banda de frecuencia alta (*high frequency band*).

HRV: variabilidad de la frecuencia cardíaca (*heart rate variability*).

LF: banda de frecuencia baja (*low frequency band*).

LnRMSSD: logaritmo neperiano de RMSSD.

Mdn: mediana.

pNN50%: porcentaje de intervalos RR consecutivos, que discrepan entre si en 50 milisegundos.

RATIO LF/HF: ratio banda de frecuencia baja / banda de frecuencia alta (*low frequency band/high frequency band*)).

RMSSD: raíz cuadrada del valor medio de la suma de las diferencias al cuadrado de todos los intervalos RR sucesivos.

RPE: escala de percepción subjetiva de esfuerzo (*rate of perceived exertion*)

SD1: Desviación estándar de los intervalos ortogonales de los puntos RR al diámetro transversal de la elipse.

SD2: Desviación estándar de los intervalos ortogonales de los puntos RR al diámetro longitudinal de la elipse.

SDNN: desviación estándar de todos los intervalos RR.

SNA: sistema nervioso autónomo.

SNAp: sistema nervioso autónomo parasimpático.

SNAs: sistema nervioso autónomo simpático.

SNC: sistema nervioso central.

SNP: sistema nervioso periférico.

TRIMP: impulso de entrenamiento (*training impulse*)

1. Introducción

1.1. Variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV)

1.1.1 Delimitación conceptual

La variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV) se puede definir como la variación de tiempo que transcurre entre las distintas ondas RR que se originan en cada latido cardíaco durante un período de tiempo determinado (Task Force, 1996) y está influido por el sistema nervioso autónomo (SNA) (figura 1). El tiempo entre latido y latido no es el mismo, por eso aparece el término variabilidad de la frecuencia cardíaca o HRV. El tiempo durante el cual se registra la HRV ha ido variando con el tiempo y también en función de la finalidad de su uso. Tal como se verá más adelante, básicamente se han utilizado 4 duraciones de registro. En adelante siempre se utilizarán estos términos para referirse a diferentes duraciones de registro.

Registro diario: 24 horas de duración del registro.

Registro largo: entre 10 minutos varias horas de registro.

Registro corto: 5-10 minutos de duración del registro.

Registro ultra-corto: <5 minutos de duración del registro.



Figura 1. Ejemplo de la variación de tiempo entre ondas RR para determinar la variabilidad de la frecuencia cardíaca.

El registro de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV) se ha convertido actualmente en un método muy usado en el mundo de la medicina y del deporte para conocer el estado del sistema nervioso autónomo (SNA) y poder sacar así diversas

aplicaciones dependiendo del campo donde se use. Concretamente en el ámbito deportivo, el ejercicio físico o el entrenamiento deportivo provoca cambios en el estado del SNA, mostrando generalmente valores de HRV más bajos después de altas cargas de entrenamiento y valores más altos ante cargas medias o bajas de entrenamiento. Conocer el estado del SNA en el ámbito deportivo es clave en la optimización del proceso de entrenamiento, ya que a través de este podemos conocer como el deportista asimila las diferentes cargas de entrenamiento, y por lo tanto conocer sus niveles de fatiga, evitando así los estados de sobre-entrenamiento (Bourdillon, Schmitt, Yazdani, Vesin, y Millet, 2017). La HRV se empezó a usar en la década de los 90 en el mundo del deporte y actualmente su uso está aumentando mucho tanto en deportes individuales como en deportes de equipo. Algunas razones que explican este aumento son por ejemplo la facilidad para su registro gracias a los adelantos tecnológicos que se han producido en los últimos años y a la fiabilidad de los datos obtenidos.

1.1.2 El sistema nervioso humano. El sistema nervioso autónomo (SNA)

Para poder entender los aspectos fisiológicos relacionados con la HRV y sus aplicaciones prácticas en el campo del deporte es necesario conocer el sistema nervioso del ser humano.

El sistema nervioso se subdivide en el sistema nervioso central (SNC), compuesto por la médula espinal y por el encéfalo, que a su vez se subdivide en cerebro, cerebelo y tronco cerebral (figura 2) y por el sistema nervioso periférico (SNP) compuesto por los nervios que salen de la médula espinal y del cráneo (que recorren todo el organismo), y los ganglios nerviosos, receptores y efectores. A su vez el SNP se divide en somático (o de relación) y autónomo (o vegetativo). El sistema nervioso autónomo (SNA) se subdivide en sistema simpático (SNAs) y parasimpático (SNAp), que rigen el control involuntario de algunos órganos de nuestro organismo, como el corazón.

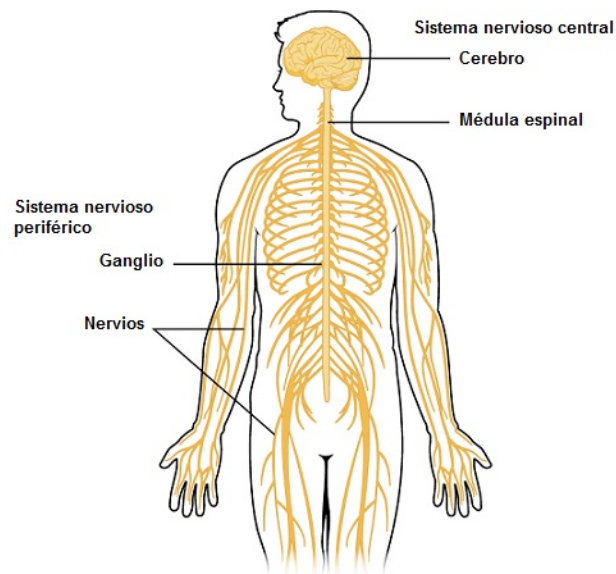


Figura 2. Sistema Nervioso Central. Modificado de www.lifeder.com

El Sistema Nervioso Central (SNC) recibe dicha denominación debido a la ubicación central respecto al eje corporal. Comprende las estructuras alojadas y protegidas por el cráneo y la columna vertebral. El SNC es el encargado de recibir la información proveniente del SNP y del central, procesarla y tomar decisiones que ejecutará el periférico (mover la mano) o el mismo central (un pensamiento).

El sistema nervioso somático o visceral consta de 12 pares de nervios craneales y 31 pares de nervios espinales. Cada nervio espinal tiene una raíz dorsal que contiene fibras sensoriales hasta la médula espinal, (antes de llegar a este tiene un ensanchamiento llamado ganglio espinal) y otra raíz ventral. Los nervios son cordones delgados de sustancia nerviosa que se ramifican por todos los órganos del cuerpo. Los pares de nervios craneales se distribuyen por las regiones de la cabeza y el cuello, con una notable excepción: el par X o nervio vago, que además de inervar órganos situados en el cuello, alcanza otros del tórax y el abdomen. La visión, la audición, el sentido del equilibrio y el gusto están mediados por los pares de nervios craneales II, VIII y VII respectivamente. De los nervios craneales también dependen las funciones motoras de la cabeza, los ojos, la cara, la lengua, la laringe y los músculos que funcionan en la masticación y la deglución. El sistema nervioso somático incluye receptores que reaccionan frente a cambios en el medio ambiente externo, manteniendo el bienestar corporal.

El SNA regula muchas funciones del cuerpo humano, principalmente funciones que se realizan de manera inconsciente como la respiración, el ritmo cardíaco etc. A su vez el SNA se divide en simpático y el parasimpático (figura 3). El SNA actúa de manera involuntaria, ayudando a mantener la homeostasis frente a cambios en el medio interno, por ejemplo, regulando la frecuencia cardíaca o la temperatura corporal. Los efectores son el músculo liso, el músculo cardíaco y algunas glándulas. Sus receptores se encuentran en las vísceras.

El SNAp se encarga de realizar una rápida disminución de la frecuencia cardíaca por impulsos eléctricos vagales de alta frecuencia. Este proceso viene dado por la liberación de acetilcolina por parte del nervio vago. Algunos de sus efectos son la contracción pupilar, la disminución de la frecuencia cardíaca (FC) y de la contractilidad cardíaca, el aumento de la motilidad, de la secreción del tracto gastrointestinal, el aumento de la secreción de insulina, el aumento de la secreción bronquial y la relajación de los esfínteres vesical y anal entre otras funciones. Básicamente, el SNAp gestiona los cambios reflejos de la FC debidos a señales procedentes de los barorreceptores arteriales y del sistema respiratorio. Las fibras del SNAp se originan por encima y por debajo de las simpáticas, es decir, en el cerebro y en la parte inferior de la médula espinal. Estas dos secciones controlan las funciones de los sistemas respiratorio, circulatorio, digestivo y urogenital.

El SNAs aumenta la FC mediante impulsos lentos de baja frecuencia. La respuesta es más lenta que la del SNAp (necesita 20-30 latidos para producirse). Este proceso está basado en la liberación de adrenalina y de noradrenalina. Entre sus efectos principales se encuentran la dilatación pupilar, el aumento de la frecuencia y de la contractilidad cardíaca, la vasoconstricción, el aumento de lipólisis, el aumento de gluconeogénesis, la disminución de la motilidad y de la secreción del tracto gastrointestinal, la contracción de los esfínteres y el aumento de la sudoración. El SNAs es el responsable de los cambios en la frecuencia cardíaca debidos a stress físico y mental. Las fibras del SNAs se originan en la región de la médula espinal, unen la cadena ganglionar simpática y penetran en los nervios espinales, desde donde se distribuyen de forma amplia por todo el cuerpo.

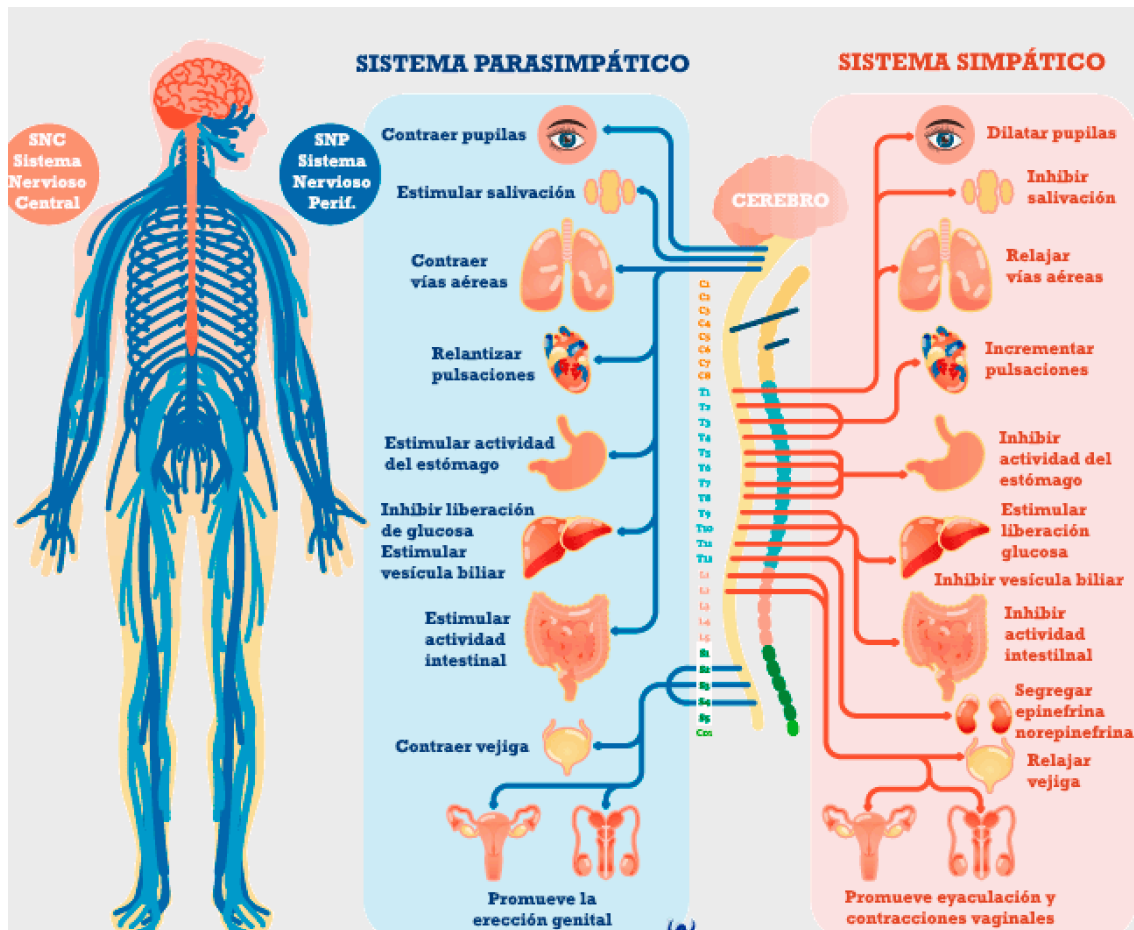


Figura 3 Sistema nervioso autónomo (simpático y parasimpático). Modificado de www.psicoactiva.com

La HRV es el resultado de las interacciones entre el SNA (con su equilibrio simpático-vagal) y el sistema cardiovascular. El análisis adecuado de este parámetro permite el estudio de la actividad del SNA de manera no invasiva (lo cual es especialmente importante en el ámbito de la medicina y entrenamiento deportivo). La actividad del SNA se basa en un equilibrio entre el SNAs y SNAp. En un estado de reposo predomina la estimulación vagal del SNAp mientras que en estados de ansiedad, stress y ejercicio físico predomina la estimulación del SNAs.

Haciendo una simplificación de lo visto anteriormente podemos deducir que estudiando la HRV se puede conocer el estado del SNAs y el SNAp (que controlan la frecuencia cardíaca entre otras funciones) y saber así, como nuestro cuerpo asimila las diferentes cargas de entrenamiento y saber cuanto tiempo necesita para volver a su situación de homeostasis inicial.

1.1.3 Uso de la HRV en el campo de la medicina

Los inicios del estudio de la HRV se remontan a hace un par de siglos. Hales empezó a estudiar las oscilaciones rítmicas y arrítmicas de la frecuencia cardíaca y la presión arterial en el siglo XIX. Unos años más tarde Albrecht von Haller describió las fluctuaciones del ritmo cardíaco. Estos trabajos fueron seguidos por los estudios de Ludwig quien estudió la presión arterial y el ritmo cardíaco en caballos y perros. Todos estos investigadores tenían el objetivo de aclarar la aparente espontaneidad de las oscilaciones de la frecuencia cardíaca (Risk, Bril, Broadbridge, y Cohen, 2001).

En la década de los 60 en el siglo XX, el uso de la HRV aumentó mucho debido a la relación que había entre esta y la detección de algunas enfermedades. Hon y Lee (1963) apreciaron en 1963 por primera vez la relevancia que podía tener la HRV en el ámbito médico cuando vieron que la angustia del feto era precedida por alteraciones en los intervalos entre latidos antes que ocurriera cualquier cambio apreciable en la frecuencia cardíaca. Sayers (1973) descubrió que había ritmos fisiológicos en la señal de ritmo cardíaco latido a latido que permitían el estudio del sistema nervioso autónomo y la relación de estos con algunas enfermedades. En la década de los 80 se confirmó la HRV como un fuerte predictor de mortalidad después de un infarto de miocardio.

En 1978 Wolf, Varigos, y Hunt (1978) correlacionaron valores bajos de variabilidad de la frecuencia cardíaca con un mayor riesgo de mortalidad post infarto. En 1981, Akselrod y cols. (1981) introdujeron un análisis espectral de las fluctuaciones de la frecuencia cardíaca para cuantitativamente evaluar el control cardiovascular latido a latido. Estos análisis de dominio de frecuencia contribuyeron a la comprensión de las fluctuaciones de intervalo entre las ondas RR durante el registro de la frecuencia cardíaca. La Rovere, Bigger, Marcus, Mortara, y Schwartz (1998) demostraron también que valores más altos de actividad nerviosa parasimpática se relacionaban con una tasa más baja de mortalidad en pacientes que habían tenido un infarto, pero todavía no se sabía que intervenciones terapéuticas se podían introducir para incrementar la actividad parasimpática. Los autores también demostraron que la variabilidad de la frecuencia cardíaca era un predictor fiable e independiente a otras variables para valorar el riesgo de

muerte post-infarto, descubriendo que valores altos de HRV se relacionaban en general, con un riesgo cardiovascular bajo.

Una vez se consolidó el uso de la HRV como parámetro para detectar enfermedades cardiovasculares o para evaluar el riesgo de muerte post infarto, los científicos vieron que la HRV podía utilizarse también para la detección de otras enfermedades. A partir de ahí se expandió el uso de la HRV en la medicina para estudiar entre otras enfermedades la diabetes. Ewing, Martyn, Young, y Clarke (1985) describieron detalladamente como una función del sistema nervioso autónomo alterada se relacionaba con una mayor mortalidad en sujetos diabéticos. También demostraron que personas con diabetes y una función del sistema nervioso autónomo alterada tenían una mayor mortalidad en un estudio de 5 años. Spallone y cols. (2011) descubrieron que una neuropatía en el sistema nervioso autónomo estaba asociada a la diabetes y que el grado de afectación del SNA se relacionaba con la gravedad/intensidad de la enfermedad.

Pagani y cols. (1986) siguieron con el análisis espectral de las fluctuaciones en la frecuencia cardíaca a finales de la década de los 80 y su dependencia del sistema nervioso autónomo y volvieron a certificar el estudio de la variabilidad de la frecuencia cardíaca en varias posiciones como una herramienta eficaz para el estudio del sistema nervioso autónomo. Estos autores encontraron que la HRV se correlacionaba negativamente con la edad. Un año antes del estudio de Pagani, Pomeranz y cols. (1985) también reforzaron la idea de que el estudio de la HRV era una herramienta muy fiable para el estudio del sistema nervioso autónomo. Un aspecto destacable de este estudio fue que midieron la HRV en 2 posiciones diferentes, bipedestación y supina. Comprobaron que las fluctuaciones de baja frecuencia en la posición supina eran determinadas por el SNAp, mientras que en la posición de bipedestación las fluctuaciones de baja frecuencia eran mediadas tanto por el SNAs como SNAp.

Ante el aumento del estudio de la HRV en el mundo médico y el comienzo del estudio de la HRV en el mundo del deporte, en 1996, desde la Asociación de cardiología europea y norteamericana redactaron un artículo para consensuar aspectos importantes alrededor de la HRV. (Task Force, 1996) Algunos de estos eran los requisitos para su registro, como analizarla e interpretarla y sobre cuales eran sus usos clínicos. Este artículo introducía una novedad que se centraba en la duración que tenía que tener cada registro.

A partir de ese momento se aconsejaron registros cortos con una duración de 10 minutos, en las que los primeros 5 minutos se usaban de estabilización y los últimos 5 minutos se usaban para el análisis de la HRV. Hasta ese momento se usaban registros largos con duraciones que oscilaban entre varias horas a 24 horas. Años más tarde aparecerían los registros ultra-cortos (Flatt y Esco, 2013; Esco y Flatt, 2014; Plews y cols., 2017b) que facilitaron la introducción definitiva y progresiva de la HRV en el mundo del deporte.

1.1.4 Uso de la HRV en campo del deporte

Antes de repasar la evolución que ha tenido la introducción de la HRV en el deporte, es interesante recordar que la HRV refleja las oscilaciones constantes de los intervalos RR de una manera no invasiva y aporta un dato preciso sobre el estado real del SNA (Task Force, 1996). Actualmente la HRV se ha convertido en un parámetro fiable para conocer el nivel de fatiga tanto en el deporte profesional como amateur (Plews y cols., 2014b). De hecho, este parámetro que valora el SNA es visto como un valor prometedor para controlar la adaptación individual al entrenamiento y por lo tanto conocer el estado real de fatiga en el que se encuentra cada deportista en cada momento concreto de la temporada (Al Haddad, Laursen, Chollet, Ahmaidi, y Buchheit, 2011; Plews y cols., 2014b). A pesar de ser un valor muy fiable y preciso, la HRV no nos aporta datos de todos los aspectos relacionados con la fatiga, estado de bienestar o rendimiento. Por eso se recomienda que su uso se combine con otros parámetros como por ejemplo datos de percepción subjetiva de bienestar del jugador, frecuencia cardíaca en reposo, datos propios del entrenamiento (como en que fase de entrenamiento, volumen, intensidad), analíticas de sangre, test físicos sencillos de realizar, como por ejemplo el salto con contra movimiento (CMJ) etc. entre otros. Así se puede obtener una visión general de cómo cada deportista o jugador está asimilando las diferentes cargas de entrenamiento y por tanto conocer los niveles individuales de fatiga (Buchheit, 2014).

Los avances tecnológicos en el registro de la HRV han facilitado la introducción del uso de la HRV en el deporte ya que ha permitido pasar de los registros hechos con electrocardiograma (que eran más caros, que se tenían que realizar en laboratorios y requerían material y personal especializado) de los inicios a los registros realizados en la actualidad con aplicaciones móviles, nuevos sensores y pulsómetros (que los propios

atletas pueden realizar en sus casas fácilmente o los cuerpos técnicos en los centros de entrenamiento).

Independientemente del avance tecnológico en el registro, un aspecto clave ha sido la reducción de la duración del registro. Durante mucho tiempo se han usado registros cortos de 10 minutos de duración siguiendo las directrices del Task Force (1996) donde los primeros 5 minutos se usaban como estabilización y durante los últimos 5 minutos se analizaba el tiempo entre ondas RR para calcular todos los parámetros de la HRV y conocer el estado SNA. Recientemente se ha demostrado que registros ultracortos en reposo, de alrededor de 1 minuto de duración con 1 de estabilización previo (1+1), tienen unas correlaciones muy altas con los 5 minutos finales que se analizaban en los registros cortos que seguían las recomendaciones de Task Force (5+5) (Esco y Flatt, 2014; Nakamura y cols., 2015). A pesar que todavía no hay consenso sobre la duración mínima de los registros ni del período de estabilización previo en el deporte profesional, estos menores tiempos de registro pueden solucionar el problema de tiempo que tienen los técnicos de los deportes de equipo cuando quieren testar a sus jugadores. Estos técnicos buscan test que sean sencillos de realizar por parte del deportista, rápidos para poder testar a muchos jugadores en un período corto de tiempo, que den información fiable, y que el proceso de obtención de esa información requiera poco tiempo y sea simple. La HRV se puede medir en la actualidad de una manera rápida, fiable y económica gracias a los avances tecnológicos y a la reducción de la duración del registro.

Otro aspecto clave y diferenciador, respecto a otros métodos de control de fatiga, que puede aumentar la aplicabilidad de la HRV en el deporte es el hecho de que dicho registro no sea invasivo, lo que permite que se pueden realizar todos los registros necesarios sin causar ningún tipo de molestia al jugador.

1.1.4.1 Uso de la HRV en función del nivel de entrenamiento. Una vez se demostró que el ejercicio físico aumentaba la HRV en poblaciones con patologías, a principios de la década de los años 90 se empezaron a estudiar en deportistas los efectos que tenían diferentes tipos de entrenamientos sobre la HRV.

Dixon, Kamath, McCartney, y Fallen (1992) realizaron uno de los primeros estudios sobre las diferentes respuestas del SNA en 10 atletas de resistencia y 14 sujetos sedentarios después de realizar ejercicio físico. Registraron la HRV y la analizaron usando los parámetros del método de frecuencias antes y después de realizar 15 minutos de carrera al 50% de la carga máxima de cada sujeto. Los autores demostraron que los atletas de resistencia tenían un mayor control vagal que los sedentarios tanto en reposo como después de realizar ejercicio físico y que el entrenamiento de resistencia modificaba el control de la frecuencia cardíaca.

Goldsmith, Bigger, Steinman, y Fleiss (1992) realizaron un registro largo de HRV durante 24 horas utilizando un Holter en 8 atletas de resistencia y 8 sujetos sedentarios. Estos volvieron a certificar que los sujetos entrenados tenían una actividad parasimpática mayor que aquellos que no la tenían tanto durante el día como durante las horas del sueño. Estos sugirieron que el entrenamiento de resistencia podía aumentar la actividad parasimpática y ser una herramienta eficaz para tratar algunas enfermedades cardiovasculares.

Siguiendo los estudios anteriores, Sacknoff, Gelim, Stachenfeld, y Coplan (1994) estudiaron el efecto que tenía sobre la HRV la realización habitual de ejercicio físico en 12 atletas y 18 sujetos control. Estos autores registraron la HRV durante 15 minutos en reposo y posición supina a los diferentes sujetos para posteriormente hacer un análisis de la HRV usando un método de frecuencias y el método de tiempo. Los autores volvieron a certificar que los atletas tenían un tono vagal más alto que los sujetos sedentarios.

Por otro lado, Furlan y cols. (1993) investigaron los efectos que tenía a corto y largo plazo el ejercicio físico sobre los mecanismos de control de la frecuencia cardíaca durante un período de 1 año. Midieron la HRV en la posición de sentado en 3 grupos diferentes de sujetos; grupo control, grupo de atletas que estaban en ese año en su pico de carga de entrenamiento y un grupo de atletas que no entrenaban ese año pero que habían entrenado durante los años previos. Los autores descubrieron que los atletas con experiencia en el entrenamiento de resistencia y que ese año habían dejado de entrenar

presentaban menor frecuencia cardíaca (FC) en reposo y una actividad vagal mayor que los sujetos del grupo control.

1.1.4.2. Uso de la HRV con objetivos deportivos. Una vez conocida la modulación de la actividad del SNA por el ejercicio tanto en poblaciones médicas como en sedentarios y deportistas, se empezaron a realizar los primeros estudios con deportistas y con objetivos deportivos y no médicos.

A partir de la década de los 90 empezaron a proliferar estudios orientados a conocer los efectos que tenía el entrenamiento de resistencia y aumentos en las cargas de entrenamiento sobre la HRV tanto en deportistas amateurs como deportistas de élite, (Ani, Munir, White, Townend, y Coote, 1996; Uusitalo, Uusitalo, y Rusko, 1998; Bonaduce y cols., 1998; Iellamo y cols., 2002; Portier, Louisy, Laude, Berthelot, y Guézennec, 2001; Hedelin, Kenttä, Wiklund, Bjerle, y Henriksson-Larsén, 2000) Por otro lado, también se empezó a estudiar la HRV durante la realización de ejercicio físico. (Yamamoto, Hughson, y Peterson, 1991; Pichon, Bisschop, Roulaud, Denjean, y Papellier, 2004; Macor, Fagard, y Amery, 1996; Shin, Minamitani, Onishi, Yamazaki, y Lee, 1995).

Objetivos deportivos del uso de la HRV en el deporte

El uso de la HRV se ha aplicado y se está aplicando en el mundo del deporte con diversos propósitos o fines. Podríamos agrupar en 3 grupos de objetivos la gran variedad de usos de la HRV en el deporte;

- 1) Uso de la HRV relacionado con la disminución de defensas inmunitarias asociadas al entrenamiento y detección del riesgo de lesión.
- 2) Uso de la HRV relacionado con el control de fatiga y sobre-entrenamiento, así como con la asimilación de cargas y afinamiento (*tapering*).
- 3) Uso de la HRV relacionado con la predicción de cambios en el rendimiento físico.

1) Uso de la HRV relacionado con la disminución de defensas inmunitarias asociadas al entrenamiento y detección del riesgo de lesión.

La HRV en el mundo del entrenamiento y competición se ha utilizado poco para correlacionar ciertos valores de HRV con un mayor riesgo de enfermedad o lesión. Sería interesante poder relacionar un valor de HRV que pudiera relacionarse con el riesgo de sufrir infecciones de vías respiratorias superiores en deportistas. Sin embargo, se ha de tener en cuenta que una infección o una lesión está influenciada por numerosos factores tanto del propio deportista como externos a este. A pesar de ello algunos autores han realizado estudios interesantes intentando relacionar ciertos valores de HRV con un mayor riesgo de lesión o sufrir infecciones.

Hellard y cols. (2011) midieron la HRV en 17 nadadores de élite 1 vez a la semana durante 2 años. usando un pulsómetro Polar. Realizaron un registro corto de 8 minutos en posición supina y de 7 minutos en posición de bipedestación por la mañana antes de realizar cualquier ejercicio o actividad física. Los autores pretendían comprobar si algunos valores de HRV se podían correlacionar con infecciones del aparato respiratorio, problemas musculares o con cualquier tipo de patología que pudiera sufrir un nadador. Los resultados mostraron que había que prestar una especial atención a la salud de los nadadores en el momento en que se producía un aumento repentino en los índices parasimpáticos 1 semana antes de que hubiera un predominio simpático en las dos posiciones medidas.

Por otro lado, Gisselman, Baxter, Wright, Hegedus y Tumilty, 2016 hipotetizaron sobre como la HRV podía indicar signos iniciales de sobrecarga muscular antes que se iniciara el dolor o se produjera incluso la lesión. Los autores confirmaron que solo el registro de la HRV para la detección de lesiones por sobreuso no era suficiente, pero comprobaron que el valor de HRV era un parámetro útil pero que este debía ir acompañado del registro de otros parámetros que ayudasen a comprender el puzle que existe en la detección de lesiones por sobreuso.

2) Uso de la HRV relacionado con el control de fatiga y sobre-entrenamiento, así como con la asimilación de cargas y afinamiento (*tapering*).

Los investigadores y miembros de los cuerpos técnicos han mostrado gran interés por este uso de la HRV. Prueba de ello es el gran número de artículos publicados que existen al respecto. El mayor número de artículos referidos a la HRV en el campo del deporte y en fútbol se basan en este objetivo concretamente. La HRV muestra gran sensibilidad en la detección de los cambios en el SNA y sus parámetros muestran el nivel de fatiga provocado por las diferentes cargas de entrenamiento y partidos. Entender o conocer el estado real del SNA o de fatiga de un futbolista es uno de los aspectos claves para conseguir su mayor rendimiento posible. En los deportes de equipo, y más concretamente en fútbol, conocer el estado físico real del jugador y como asimila las diferentes cargas nos puede permitir individualizar todos los aspectos que puedan influir en su rendimiento como cargas de entrenamiento, pautas de recuperación etc. A pesar de la alta fiabilidad que tiene la HRV es aconsejable que el parámetro de la HRV se combine y se correlacione con otros parámetros (analíticas, escalas de percepción subjetiva, test de rendimiento o valores de GPS (*global positioning system*) etc. para tener una visión más global y precisa del estado del jugador.

Los primeros artículos orientados a controlar los efectos del entrenamiento y más concretamente a evitar el temido sobre-entrenamiento y buscar el máximo rendimiento en el momento de la competición, o pico de forma (*overreaching*) se llevaron a cabo en deportes individuales cíclicos de resistencia como el triatlón, remo o corredores de fondo (Bosquet, Papelier, Léger y Legros, 2003; Le Meur y cols., 2013; Kiviniemi, Hautala, Kinnunen y Tulppo, 2007; Plews Laursen, Kilding y Buchheit, 2010a; Plews, Laursen, Kilding y Buchheit, 2012; Flatt, Hornikel y Esco, 2017c). Todos los autores estudiaron la evolución de la HRV durante un período de entrenamiento con cargas altas y durante un posterior período de afinamiento (*tapering*), caracterizado por cargas bajas, que precedía a la competición. A partir de ahí comprobaron si los atletas habían llegado en un momento óptimo para rendir al máximo en la prueba o por el contrario las cargas previas a la competición habían sido excesivas y los atletas tenían cierto grado de fatiga que nos les permitía rendir al máximo. Para ello, utilizaron diferentes protocolos de registro en sus estudios. Otro propósito de los autores fue comprobar como asimilaban las cargas de entrenamiento los atletas con el paso del tiempo y dependiendo de esta asimilación los

entrenadores prescribían unas u otras cargas de entrenamiento. Por otro lado, Chen y cols. (2011) observaron una reducción en la HRV 24 horas después de realizar una sesión intensa de entrenamiento en halterófilos. Los autores comprobaron también que los atletas volvían a valores normales después de 72 horas de recuperación, indicando una clara correlación entre HRV y el tiempo de recuperación. Earnest y cols. (2004) certificaron en ciclistas profesionales que la HRV era una herramienta útil y fiable para evitar el sobre-entrenamiento tras registrar valores de HRV durante la vuelta a España (3 semanas de duración). Edmonds, Sinclair y Leicht (2013) examinaron la HRV para conocer la influencia que tenía una semana de entrenamientos y una competición sobre el SNA en 9 jugadores jóvenes de rugby. Los autores comprobaron que el valor de RMSSD disminuía el día de la competición y que los valores más bajos eran los valores de los dos días posteriores a la competición. Estos resultados podían ayudar a distribuir de una manera más adecuada e individualizada la carga semanal de entrenamiento.

Buchheit, Mendez-Villanueva, Quod, Poulos y Bourdon (2010b) fueron unos de los primeros que aplicaron el uso de la HRV en fútbol. En esta investigación Buchheit y sus compañeros estudiaron las oscilaciones que tenían los diferentes aspectos de la FC, y dentro de estos la HRV, durante un período competitivo de 3 semanas en 33 futbolistas jóvenes. Los registros cortos de la HRV fueron post ejercicio y sentados durante 5 minutos después de hacer 5 minutos de carrera a 9 km/h. Los autores certificaron la importancia que tenían los diferentes valores de FC para entender la asimilación de cargas. Thorpe y cols. (2015) correlacionaron las cargas diarias de entrenamiento con niveles de fatiga usando la HRV en 10 futbolistas profesionales durante 17 días de alta densidad competitiva. Naranjo, De la Cruz, Sarabia, De Hoyo y Domínguez (2015a) fueron los primeros autores en estudiar las oscilaciones y el comportamiento de la HRV durante temporada completa en un equipo profesional de fútbol. Su objetivo era conocer el estado de fatiga de los jugadores. Para ello realizaron 1 registro corto por semana de 10 minutos en posición supina. Comprobaron que el valor de RMSSD junto a otros valores de analíticas etc., les daba información útil para gestionar el estado de fatiga de los jugadores a lo largo de una temporada y poder así individualizar la prescripción de cargas de entrenamiento.

Finalmente, autores como Boullosa y cols. (2013), Botek, Krejčí, y Weisser (2014), Vilamitjana, Lentini y Perez (2014), Flatt, Esco, Nakamura y Plews (2017b),

Flatt, Esco y Nakamura (2017a), Krejčí, Botek, y McKune (2018) han estudiado los efectos que tenían períodos cortos de entrenamiento (6-8 semanas, como por ejemplo una pretemporada) sobre la HRV con el objetivo de conocer el proceso de asimilación de cargas por parte de los jugadores y por lo tanto conocer los niveles de fatiga de sus jugadores. Estos autores realizaron sus estudios tanto en jugadores profesionales como en jugadores y jugadoras jóvenes y usaron protocolos de registro diferentes.

Respecto a la fase de recuperación post-esfuerzo específicamente, cabe destacar algunos artículos sobre recuperación post ejercicio, Buchheit, Peiffer, Abbiss y Laursen (2009) certificaron con 10 ciclistas que inmersiones en agua fría reactivaban el SNAp y por lo tanto facilitaba la recuperación post esfuerzo. Unos años más tarde, Douglas, Plews, Handcock y Rehrer (2016) coincidieron con los hallazgos de Buchheit y cols. (2009) y demostraron que inmersiones en agua fría después de un partido de rugby 7 reactivaba el SNAp. Finalmente, Flatt y Esco (2016a) certificaron en jugadoras de fútbol como la inmersión en agua fría después de un entrenamiento o partido reactivaba la actividad parasimpática y reducía las molestias musculares. Para ello, las jugadoras respondieron un cuestionario de percepción subjetiva de bienestar donde reflejaban que las molestias musculares habían disminuido y que la calidad de sueño aumentaba al día siguiente de realizar inmersiones en agua fría.

Los hallazgos de estos artículos son claves para entender que una buena recuperación post ejercicio es esencial para mejorar la asimilación de cargas de entrenamiento. Esta recuperación no solo reactiva el SNAp, sino que también se reducen las molestias musculares que sufre el jugador. Esta reducción de molestias a nivel muscular favorece que la calidad del sueño del futbolista aumente, siendo el sueño una de los momentos más importantes de recuperación mental y muscular no solo en los deportistas sino en la raza humana.

3) Uso de la HRV relacionado con la predicción de cambios en el rendimiento.

En este apartado encontramos pocos artículos debido a la dificultad que tiene predecir rendimiento tanto en deportes individuales como por supuesto en deportes colectivos usando solo un parámetro de registro y análisis. La razón es clara, el

rendimiento tanto individual como colectivo esta influenciado por muchos factores, tanto internos como externos del deportista.

Cornforth, Campbell y Nesbitt (2015) consiguieron predecir el rendimiento de jugadores de fútbol australiano (correlación de 0,70) midiendo la HRV de 44 jugadores durante 3 meses y correlacionándola con la información obtenida con los dispositivos GPS que llevaban los jugadores tanto en los entrenamientos como en los partidos.

Buchheit, Simpson, Al Haddad, Bourdon y Méndez-Villanueva (2012) intentaron comprobar la validez de usar la FC durante el ejercicio, la frecuencia cardíaca post ejercicio y la HRV durante y después de un test submáximo de carrera para predecir cambios en el rendimiento físico durante una temporada con futbolistas jóvenes. 92 jugadores (media 15 años) realizaron varios test físicos en 2 ocasiones separados 3-4 meses entre si. Los jugadores corrieron durante 5 minutos a 9 km/h y después se les hicieron registros cortos de HRV durante 5 minutos sentados. Los autores certificaron que aumentos de la HRV post-ejercicio se correlacionaban con mejoras en la velocidad aeróbica máxima. Finalmente, Buchheit (2015) comprobó en 37 jugadores jóvenes de balonmano como un solo registro corto de 10 minutos en posición supina de HRV cada 3 o 4 semanas tenía muchas limitaciones a la hora de predecir cambios en el rendimiento físico.

1.1.4.3 HRV en el campo del deporte amateur. Los primeros estudios se centraron en deportes cíclicos individuales de resistencia con atletas no profesionales cuyos autores demostraron que el análisis de la HRV proporcionaba información fiable del nivel de adaptación del atleta a las diferentes cargas de entrenamiento y por tanto del nivel de fatiga que presentaba el deportista. Es importante recordar que la HRV puede tener un mayor peso a la hora de analizar los efectos de los distintos tipos de entrenamientos sobre el SNA y el rendimiento en los deportes de resistencia cíclicos e individuales que en los deportes de equipo. La razón es que en los deportes de equipo hay más variables implicadas que pueden afectar a las cargas de entrenamiento y al rendimiento.

Ani, Munir, White, Townend, y Coote (1996) analizaron los cambios que se producían en la HRV después de un programa de entrenamiento de resistencia de 6 semanas de duración en 11 sujetos. El programa de entrenamiento consistía en realizar 25 minutos de bicicleta cada día a una intensidad alrededor del 80% de la frecuencia cardíaca máxima. Los autores comprobaron que todos los sujetos incrementaron su actividad vagal después del período de ejercicio aeróbico.

Uusitalo, Uusitalo, y Rusko (1998) realizaron uno de los primeros estudios de HRV solo con mujeres usando el electrocardiograma. Los registros tuvieron una duración de 5 minutos en posición supina (no se especifica el tiempo de estabilización). Estos autores investigaron los efectos de un entrenamiento de resistencia intenso de 6 semanas sobre la HRV y SNA. Este entrenamiento no produjo cambios en la frecuencia cardíaca ni en la modulación del sistema nervioso autónomo. Pichon, Bisschop, Roulaud, Denjean, y Papellier (2004) estudiaron la HRV en 14 atletas sanos durante ejercicio físico de alta intensidad usando un pulsómetro Polar (Polar Vantage, Kempele; Finland) en dos días distintos y encontraron que la HRV no reflejaba el estado del sistema nervioso autónomo durante la realización de ejercicio físico.

Flatt, Hornikel y Esco (2017c) estudiaron el LnRMSSD en 10 nadadores universitarios con registros muy cortos de 1 minuto y 1 minuto previo de estabilización en posición de sentado durante 5 semanas (1+1). Los autores usaron un sensor de dedo y una aplicación móvil para la registro comprobando que la HRV es sensible a las variaciones de las cargas de entrenamiento y es útil para seleccionar las distintas cargas de entrenamiento durante 5 semanas. Bellenguer y cols. (2015) midieron la HRV con el objetivo de estudiar la respuesta de esta ante diferentes tipos de entrenamiento en 15 triatletas amateurs. Realizaron registros de 3 minutos primero en posición supina (0+3) y después seguidamente 3 minutos más en bipedestación (3+3) usando un pulsómetro polar RS800 (Polar Vantage, Kempele; Finland) cada mañana durante 4 semanas. Los autores comprobaron que la actividad vagal aumentaba tanto en los atletas que habían mejorado su rendimiento como también en aquellos que lo habían empeorado y que era necesario realizar registros subjetivos de la intensidad del entrenamiento y estado físico para una mejor interpretación de la HRV.

1.1.4.4 HRV en el campo del deporte profesional. La introducción de la HRV en el deporte profesional ha ido aumentando paulatinamente en los últimos años. Al igual que pasó en la introducción de la HRV en el deporte amateur, la HRV en el ámbito del deporte profesional se empezó a usar antes en deportes aeróbicos individuales cíclicos (donde los autores han demostrado la capacidad que tiene la HRV para conocer la asimilación a las diferentes cargas de entrenamiento por parte de los deportistas (Portier y cols., 2001; Iellamo y cols., 2002) que en deportes intermitentes de equipo. No obstante, el número de equipos que han empezado a usar la HRV para controlar el estado de fatiga de sus jugadores va en aumento. Todavía hay una falta de consenso general en el ámbito deportivo respecto al protocolo de registro (duración del registro, duración del período de estabilización, posición durante el registro y qué parámetros usar para su interpretación (Schneider, Hanakam, y Wiewelhove, 2018; Ravé y cols., 2018). Esta falta de consenso en el protocolo puede explicar que algunos equipos de deportes de equipo hayan empezado recientemente a usar la HRV en su proceso de control de las cargas de entrenamiento.

1.1.4.4.1. HRV en el campo del deporte profesional: deportes individuales. A inicios del siglo XXI se empezaron a realizar muchos estudios de la HRV en deportistas de élite con diferentes objetivos; conocer los efectos de los entrenamientos sobre los deportistas, predecir cambios en el rendimiento o predecir lesión o enfermedad. Estos deportistas de élite seguían perteneciendo a disciplinas cíclicas de resistencia como el ciclismo, remo, carreras de resistencia etc. Los registros han evolucionado de los cortos a los ultra-cortos después de que varios autores hayan demostrado su validez y la alta correlación que tienen estos respecto a los registros cortos de 10 minutos (Esco, Flatt, y Nakamura, 2017; Flatt y Esco, 2013; Plews, Laursen y Buchheit, 2017a).

Macor, Fagard, y Amery (1996) compararon los valores de HRV y presión arterial en reposo y durante un test incremental en un cicloergómetro en 10 ciclistas que competían en diferentes competiciones y 10 sujetos sedentarios. Observaron que los ciclistas tenían una actividad vagal más alta en reposo mientras que durante el ejercicio la actividad vagal disminuía y aumentaba la actividad simpática en ambos grupos. Portier, Louisy, Laude, Berthelot, y Guézennec (2001) empezaron a hablar de que el entrenamiento producía una fatiga simpática y parasimpática después de hacer un análisis

cardiovascular. En su estudio, 8 atletas de élite realizaron un entrenamiento de alta intensidad durante 12 semanas y sus valores de HRV disminuyeron después de este período indicando que la HRV podía detectar fatiga y por consecuencia detectar signos de sobre-entrenamiento. Siguiendo esta línea, Iellamo y cols. (2002) estudiaron los efectos sobre la HRV que tenía un aumento de la carga de entrenamiento entre el 75 y el 100% en 7 jóvenes del equipo nacional italiano de remo. Se realizó 1 registro corto con electrocardiograma de 10 minutos de duración en reposo y posición supina en cada uno de los 3 meses previos al campeonato del mundo de remo tomando los primeros 5 minutos como el tiempo de estabilización y analizando los últimos 5 minutos (5+5) siguiendo las directrices del Task Force (1996). Los resultados mostraron como cargas de entrenamiento moderadas aumentaban los valores de HRV mientras que cargas altas de entrenamiento provocaban valores de HRV más bajos.

Bonaduce y cols. (1998) realizaron 2 registros diarios usando un Holter durante 24 horas para estudiar la HRV en 15 ciclistas de élite. Su objetivo era conocer los efectos que tenía un entrenamiento de alta intensidad sobre la frecuencia cardíaca y la modulación del SNA. Concluyeron que la FC disminuía y los valores de HRV analizados con el método de tiempo y frecuencias no variaban respecto a los previos al estudio. Earnest y cols. (2004) analizaron 3 veces la HRV durante 3 semanas en 8 ciclistas profesionales durante la Vuelta a España. Los autores realizaron registros largos de 15 minutos de duración (analizando los últimos 4 minutos, 11+4) en posición supina con un pulsómetro Polar y comprobaron que las cargas altas de competición reducían considerablemente los valores de HRV y que la HRV era un valor muy eficaz para modular las diferentes cargas y evitar así el temido estado de fatiga crónica o sobre-entrenamiento. Hedelin, Kenttä, Wiklund, Bjerle, y Henriksson-Larsén (2000) analizaron los efectos que tenía una semana de entrenamientos con una carga alta en 9 canoistas de élite. Comprobaron que la HRV en reposo había descendido después de esta semana indicando un nivel de fatiga en los deportistas.

Plews, Laursen, Kilding, y Buchheit (2012) comprobaron en 3 triatletas profesionales que la media semanal de HRV era un valor más fiable que el valor diario de esta y que se necesitaban 3 registros a la semana de RMSSD como mínimo para que el valor semanal se pudiera interpretar de una manera fiable. Estos autores analizaron el

LnRMSSD durante 9 semanas con registros cortos de 6 minutos de duración en posición supina donde se analizaban sólo los últimos 5 minutos (1+5). Para los registros usaron un pulsómetro Polar RS800 (Polar Electro, Kemple, Finland). Plews, Laursen, Kilding, y Buchheit (2014a) registraron el logaritmo neperiano de RMSSD (LnRMSSD) en 9 remeros de élite (4 mujeres y 5 hombres) durante 6 meses realizando registros cortos de 6 minutos de duración en posición supina donde se analizaban sólo los últimos 5 minutos (1+5). Para los registros usaron un pulsómetro Polar RS800 (Polar Electro, Kemple, Finland). Los autores comprobaron como se reducía la actividad parasimpática en las fases de alta intensidad, mientras aumentaba en las fases donde la intensidad de los entrenamientos era baja. Plews, Laursen, y Buchheit (2017a) volvieron a estudiar el LnRMSSD en 4 remeros de élite durante 7 semanas realizando registros ultra-cortos en posición supina con 30 segundos de estabilización y 1 minuto de duración usando una banda Polar bluetooth y una aplicación móvil (0,5+1). Los autores demostraron que el estudio de la HRV es una herramienta útil para indicar adaptaciones positivas al entrenamiento y por lo tanto conocer el nivel de fatiga del deportista.

Schmitt y cols. (2015) investigaron los cambios en la HRV en 57 esquiadores de élite para clasificar los diferentes tipos de fatiga usando un pulsómetro (T6, Suunto, Vantaa, Finland). Realizaron registros cortos en reposo en posición supina durante 8 minutos y justo después realizaron registros en bipedestación de 7 minutos de duración. Analizaron los últimos 5 minutos del registro en posición supina (3+5) y del minuto 1 al 6 en el registro en bipedestación. Estos autores clasificaron 4 tipos de fatiga para las dos posiciones de registro. Por otro lado, Hellard y cols. (2011) estudiaron durante 2 años si la HRV se relacionaba con infecciones del aparato respiratorio en 7 nadadores de élite y 11 nadadores de nivel nacional. Realizaron un solo registro largo por semana de 16 minutos de duración con 15 minutos previos de estabilización un pulsómetro Polar RS800 (Polar Electro, Kemple, Finland), Los registros se realizaron 8 minutos en posición supina y 8 en bipedestación. Los autores analizaron los 6 últimos minutos de los 8 minutos de registro (17+7 para la posición supina y 25+6 para la posición de bipedestación). Los autores comprobaron que un incremento repentino de los índices del SNAp aconsejaba prestar atención a la salud de los nadadores. Abad y cols. (2017) registraron la HRV en 15 esprinters de élite (7 hombres y 8 mujeres) con el objetivo de comprobar si existían diferencias en los valores de la HRV entre las dos posiciones de registro, supina y bipedestación. Realizaron registros largos de 15 minutos de duración en la posición

supina (analizando los últimos 5 minutos, 10+5) y a continuación registros cortos de 10 minutos de duración para la posición de bipedestación (5+5) utilizando un pulsómetro y el programa Firstbeat® (Finlandia) Comprobaron que no existían diferencias en los valores de HRV entre las dos posiciones de registro ni en hombres ni en mujeres.

Finalmente, Bourdillon, Schmitt, Yazdani, Vesin y Millet (2017) analizaron diferentes parámetros de HRV en 3 atletas olímpico (1 hombre y 2 mujeres) que participaban en las disciplinas de natación o biathlon usando un pulsómetro Suunto (Vantaa, Finlandia). Los autores certificaron que la HRV es un método eficaz para controlar la asimilación de cargas en los atletas. Para ello, realizaron registros cortos en posición supina de 7 minutos de duración y a continuación registros en posición de bipedestación de una duración de 6 minutos. Los autores propusieron que los registros en posición supina de HRV que basaban su análisis en RMSSD debían de ser de 2 minutos de duración y que debían tener 1 minuto previo para la estabilización de la FC, es decir, en total 1+2.

1.1.4.4.2 Uso de la HRV en el fútbol profesional. El fútbol, catalogado como un deporte de equipo de cooperación-oposición de carácter intermitente, está determinado por la alternancia de esfuerzos realizados a diferentes intensidades con periodos de recuperación que varían, siendo necesario desarrollar un buen nivel de condición física para obtener un buen rendimiento deportivo (Castagna, Impellizzeri, Cecchini, Raminini y Barbero, 2009). Durante un partido de fútbol los jugadores cambian de actividad cada 5 segundos y realizan unas 1300 acciones, realizando 200 de estas a alta intensidad (Mohr, Krstrup y Bansgbo, 2003). Junto a la carrera los jugadores realizan diversas actividades que requieren un alto nivel de producción de fuerza como aceleraciones, cambios de dirección, regates, entradas etc. (Rampinini y cols., 2011).

El rendimiento en fútbol es el resultado de la influencia e interacción de muchos factores tanto del propio jugador o equipo como factores externos a este (Bradley y Noakes, 2013; Paul, Bradley y Nassis, 2015). Un rendimiento físico óptimo depende de una eficiente y eficaz gestión de las cargas de entrenamiento, competición y de los niveles de fatiga de los deportistas (Buchheit, 2014). La toma eficaz de decisiones sobre aspectos relativos al rendimiento del jugador requiere el manejo e interpretación de muchos datos

referentes a las cargas de entrenamiento, estado físico de los jugadores, rendimiento en partidos, niveles de fatiga entre otros.

El número de jugadores por equipo y la necesidad de realizar varios registros a la semana para llevar a cabo una monitorización frecuente de los jugadores (con lo que ello implica a nivel de tiempo) ha sido un desafío y en algunos casos un impedimento para los cuerpos técnicos de los equipos a la hora de introducir la HRV con registros cortos en su proceso de control de cargas de entrenamiento y niveles de fatiga (Schneider y cols., 2018). En los últimos años diferentes autores han demostrado la validez de los registros ultra-cortos para el estudio de la HRV (Bourdillon, y cols., 2017; Esco y Flatt, 2014; Plews y cols., 2017b) lo que ha ayudado a los cuerpos técnicos de los equipos a reducir el tiempo empleado para el registro de la HRV, solucionando así el problema del tiempo, uno de los grandes inconvenientes que tenía el uso de la HRV en el fútbol profesional.

Junto a la reducción del tiempo de registro, el hecho que el registro de la HRV no requiera un equipamiento muy avanzado y caro, no requiera mucho tiempo para su análisis y sobretodo que sea un método no invasivo para conseguir información sobre el estado del SNA, ha provocado que muchos equipos profesionales hayan decidido empezar recientemente a tener en cuenta el parámetro de la HRV en sus procesos de entrenamiento y control de cargas.(Aubert, Seps, y Beckers, 2003; Borresen y Lambert, 2008; Plews y cols., 2014b). El hecho que sea un método no invasivo es fundamental y clave para poder realizar todos los registros que se consideren necesarios, teniendo en cuenta siempre realizar como mínimo 3 o más registros a la semana en deportistas profesionales como propone Plews y cols. (2014b) para que el valor de la media semanal de la HRV sea fiable y pueda reflejar los efectos de las cargas de entrenamiento de esa semana. Estas características facilitan que se pueda medir la HRV con bastante regularidad en el fútbol profesional (aunque es obvio que no es fácil medir a tantos jugadores y con tanta frecuencia).

El estudio y aplicación práctica para el control de cargas de entrenamiento y nivel de fatiga con el uso de la HRV en el fútbol profesional no se está usando con la frecuencia que se podría esperar a pesar de las enormes ventajas que se han enumerado en el párrafo anterior. Por ejemplo, Ravé y cols. (2018) comprobaron que solo 26 equipos profesionales de fútbol, de los 72 que respondieron a la encuesta, utilizaron la HRV

durante la temporada 2015-2016. Los autores encontraron diferentes protocolos de medición y registro entre los 26 equipos que habían confirmado que usaban la HRV. La encuesta se envió a 137 equipos que participaban en las dos competiciones europeas; la Champions League y la Europa League.

A pesar del incremento paulatino que está teniendo el uso de la HRV en el fútbol profesional en los últimos años no existe un protocolo aceptado por todos lo que provoca que haya todavía equipos profesionales que no usen la HRV en sus procesos de control de carga y fatiga. Hay cierta confusión sobre los métodos de registro, análisis e interpretación de parámetros, que parámetros analizar, duración del registro y posición. (Esco, Williford, Flatt, Freeborn y Nakamura, 2018; Bellenger y cols., 2016; Buchheit, 2014; Plews, Laursen, Stanley, Kilding y Buchheit, 2013).

Los pocos artículos publicados hasta el día de hoy quizá no reflejen la realidad de cómo y qué se este analizando respecto a la HRV en el fútbol profesional y por eso, podemos decir que hay mucha distancia entre la ciencia y la práctica, a pesar que el conocimiento científico de los investigadores debería ayudar a los cuerpos técnicos en su implantación y en la interpretación de los datos. En cualquier caso, en lo que si hay unanimidad entre los investigadores y cuerpos técnicos es en que los datos referentes a la HRV se han de combinar con otra serie de parámetros de rendimiento, fisiológicos del propio jugador, para tener una visión más global del estado del jugador, y con parámetros del entrenamiento ya que las características del entrenamiento tienen una influencia alta en el estado del SNA (Plews y cols., 2014b; Lamberts, Rietjens, Tjink, Noakes y Lambert, 2010).

A continuación, se enumeran algunos estudios realizados en futbolistas profesionales que muestran la falta de consenso en el protocolo de registro e interpretación de la HRV.

Ravé y Fortrat (2016) registraron 4 veces la HRV en 20 futbolistas profesionales en un período de 5 semanas. Los registros cortos se realizaron con una banda del Polar Team 2 (Polar Electro, Kempele, Finland) por las mañanas y tuvieron una duración de 10 minutos para los registros en posición supina y de 7 minutos para la posición de bipedestación. Analizaron parámetros de frecuencia como el LF, HF y la ratio LF/HF y

también parámetros de tiempo como el RMSSD. Comprobaron que los registros de la HRV en posición de bipedestación eran más eficaces que los registros realizados en posición supina para controlar la asimilación de las distintas cargas de entrenamiento por parte de los jugadores.

Por su parte, Boullosa y cols. (2013) midieron la HRV en 8 jugadores profesionales al inicio y al final de la pretemporada. Estos tenían el objetivo de evaluar los efectos que tenía el entrenamiento sobre el SNA. Realizaron registros largos de la HRV durante el sueño nocturno, 3 horas cada día, 4 días consecutivos con un pulsómetro en la primera y última semana de pretemporada. Los parámetros que analizaron fueron de tiempo (RMSSD, CVRMSSD, SDNN), frecuencias (LF, HF) y no lineales (SD1, SD2). Los autores comprobaron que el análisis de la HRV durante el sueño nocturno servía para conocer las adaptaciones producidas por el entrenamiento. Naranjo y cols. (2015a) midieron la HRV en 22 jugadores de un equipo profesional español durante toda una temporada. Los autores querían conocer el perfil de la HRV tanto a nivel individual como grupal durante una temporada. Para ello hicieron un registro corto por semana de 10 minutos de duración en la posición de sentado en los 11 meses que duró la temporada. Los autores analizaron parámetros del método de frecuencias, tiempo y no lineares.

Thorpe y cols. (2015) estudiaron la HRV después de un breve calentamiento en 10 jugadores profesionales durante un período de 17 días. El calentamiento consistía en hacer 5 minutos de bici a una intensidad de 130W (85 rpm). El registro corto empezaba justo al acabar los 5 minutos de bici y se realizaba en posición sentado y tenía una duración de 5 minutos. El parámetro estudiado era el LnRMSSD. Su objetivo era conocer el nivel de fatiga de los jugadores analizando también otros parámetros junto a la HRV. Vilamitjana y cols. (2014) analizaron la HRV el día de partido en 17 jugadores durante varios meses, justo al despertarse en el hotel de concentración. Realizaron mediciones cortas de 10 minutos de duración en posición de supina y 10 minutos en posición sentada. El propósito era comparar el nivel de fatiga de un jugador comparándolo al de sus compañeros.

Semjon, Botek, McKune y Svozil (2016) registraron la HRV con el objetivo de conocer el perfil de HRV que tenían las diferentes demarcaciones de los jugadores. Realizaron un solo registro con electrocardiograma a cada jugador en posición supina,

sentado y en bipedestación al llegar al laboratorio y antes de realizar cualquier tipo de ejercicio físico. Los autores comprobaron que los jugadores de campo tenían unos valores de HRV similares y que se diferenciaban mucho de los valores de los porteros. En otro estudio, Botek, Krejčí, McKune y Klimešová (2016) analizaron la HRV en jugadores profesionales de la República Checa. Todos los jugadores analizados realizaron un registro de la HRV en un período de 4 años. El registro se realizó con electrocardiograma y en posición supina y analizaron RMSSD, LF, HF y la ratio LF/HF. Los autores midieron a 153 jugadores y comprobaron que tanto el LF como el LnRMSSD se correlacionaban negativamente con la edad. Proietti y cols. (2017) comprobaron que algunos parámetros de la HRV son diferentes en jugadores profesionales y jugadores profesionales que juegan competiciones europeas. También certificaron que el LnRMSSD es un parámetro muy útil para conocer los efectos del entrenamiento en el futbolista. Para ello realizaron registros cortos de 10 minutos de duración en posición sentado a 54 jugadores de 3 equipos diferentes y de 2 países diferentes.

Cada uno de los artículos nombrados anteriormente ha utilizado un protocolo diferente lo que muestra una falta de consenso en el uso de la HRV en el fútbol profesional. Los nuevos avances tecnológicos han permitido reducir el coste económico de los dispositivos de registro y reducir los registros cortos de 10 minutos de duración que proponía el Task Force (1996) a registros ultra-cortos de 1 minuto (Flatt y Esco, 2013; Flatt y Esco, 2015; Esco y cols., 2017; Plews y cols., 2017b) lo cual facilita el registro en los equipos ya que se requiere menos tiempo. La posición durante el registro es un aspecto en el que tampoco hay consenso.

Respecto al parámetro más fiable de la HRV, RMSSD es el que cuenta con mayor respaldo del mundo científico para conocer el estado del SNA (Al Haddad y cols., 2011) debido a que el ritmo de respiración no influye en este (Saboul, Balducci, Millet, Pialoux y Hautier, 2016), se puede medir con registros ultra-cortos (Plews y cols., 2017b; Esco y Flatt, 2014) y se puede calcular fácilmente sin necesidad de un software especializado. Respecto a cuando hacer el registro, parece que los registros largos por la noche o justo después de despertarse son los más recomendados en general (Buchheit, 2014; Plews y cols., 2014b) debido a que las condiciones en el registro son siempre muy similares y el jugador no se ve afectado por factores externos (como estrés, café etc.) o por los factores propios de la actividad cotidiana del jugador. La realidad y nuestra experiencia dicen que

hacer registros justo al despertarse son muy costosos (ya que hay días que se olvidan, se duermen etc.) y requieren un altísimo grado de implicación por parte del jugador. Esto provoca que los equipos que usan la HRV decidan realizar los registros en el centro de entrenamiento justo al llegar a ellos y antes de desayunar. Destacar también que los valores de HRV deben de ser analizados junto a otros parámetros para poder sacar conclusiones fiables sobre el estado físico de los jugadores, niveles de fatiga y sobre el rendimiento, porque en los deportes de equipo, y concretamente en fútbol, el rendimiento depende de números factores.

1.1.4.4.3. Uso de la HRV en el fútbol en jóvenes. Bricout, Deschenaud y Favre-Juvin (2010) realizaron registros de HRV a 8 futbolistas jóvenes en 3 días diferentes, día post descanso, día post entrenamiento y día post partido durante un período de 5 meses. Los autores observaron como los valores de HRV post partido eran diferentes a los valores de los otros dos tipos de día y concluyeron que la HRV era un parámetro objetivo y útil para el control de cargas de entrenamiento en jóvenes futbolistas. Buchheit y cols. (2012) realizaron registros cortos de 5 minutos de duración de HRV en posición sentada después de realizar 5 minutos de carrera en jóvenes futbolistas a 9 km/h. Su objetivo era predecir el rendimiento físico junto a otras variables físicas. Botek y cols. (2014) analizaron la HRV en 12 futbolistas jóvenes. Realizaron un registro antes del inicio de una pretemporada de 8 semanas y 1 registro después de esta. Los registros se realizaron con electrocardiograma y en posición supina y de pie. Los autores comprobaron como los valores de HRV no se modificaron después de la pretemporada. Cataldo y cols. (2016) realizaron un estudio con 12 jóvenes futbolistas y observaron que cuando había una predominancia parasimpática en el SNA el pico de potencia y la media de la potencia desarrollada era más alta. Los autores certificaron que la HRV es un parámetro útil para monitorizar el estado físico en jóvenes futbolistas.

1.1.4.4.4. Uso de la HRV en el fútbol femenino. Flatt y Esco (2015) comprobaron que la media semanal de HRV obtenidos durante 3 y 5 días a la semana se correlacionaban con las cargas de entrenamiento en la posición supina mientras que para la posición en bipedestación eran necesarios 5 registros a la semana. Para ello realizaron registros ultracortos de 1 minuto de duración y 1 minuto de estabilización previo a 8 jugadoras durante 3 semanas en la posición supina y en bipedestación. Posteriormente, Flatt y Esco (2016a) correlacionaron descensos en el coeficiente de variación (CV) semanal de LnRMSSD con

adaptaciones positivas a las diferentes cargas de entrenamiento durante 5 semanas en 12 jugadoras realizando registros ultra-cortos. En otro estudio con jugadoras, Flatt y cols. (2017a) realizaron registros ultra-cortos de 1 minuto de duración precedido de 1 minuto de estabilización en 8 jugadoras de nivel universitario. Los registros se realizaron con un sensor de dedo (validado previamente (Heathers, 2013)), la aplicación Ithlete® y en posición sentado. Los autores pretendían analizar los cambios que se producían en la HRV durante 2 semanas de entrenamiento en el período de pretemporada. Estos certificaron que la HRV era un parámetro útil para controlar la acumulación de fatiga. Finalmente, Flatt y cols. (2017b) estudiaron los efectos que tenían 2 semanas de entrenamiento en el LnRMSSD en 10 jugadoras de fútbol universitarias usando también registros ultra-cortos en posición supina de 1 minuto de duración precedidos de 1 minuto de estabilización (1+1). Los autores usaron la aplicación Ithlete® y una banda polar para llevar a cabo los registros. Los resultados obtenidos por los autores muestran que las jugadoras con un nivel físico más bajo sufrieron reducciones más grandes en la HRV que las jugadoras con un nivel condicional más alto. Por otro lado, Costa, Brito, Nakamura, Oliveira y Rebelo (2018) realizaron registros largos a 18 jugadoras durante las horas de sueño usando un pulsómetro para el registro de la FC y la HRV. Los autores registraron la FC y la HRV en 8 noches en las que las jugadoras habían entrenado por la tarde y en 8 noches en las que las jugadoras no habían entrenado. Los resultados mostraron que los entrenamientos por la noche podían influir en la calidad del sueño y en la FC. También descubrieron que los valores de HRV de los días que habían entrenado y no habían entrenado eran muy similares indicando que la carga del entrenamiento no había sido lo suficientemente alta para alterar el estado del SNA.

1.1.5. Protocolo de registro de la HRV

Una característica peculiar respecto a la HRV es que no hay un único protocolo de registro aceptado por parte de los investigadores ni por parte de los profesionales que trabajan con los deportistas. Este matiz hace que en una revisión bibliográfica nos podamos encontrar variedad de protocolos y por lo tanto la interpretación de resultados no es comparable, a diferencia de otros parámetros que se miden normalmente en el mundo del deporte (analítica de sangre, test físicos, por ejemplo) donde el protocolo es el mismo y por tanto la comparación de datos y las conclusiones se pueden poner en común.

Como se ha comentado anteriormente, la HRV se empezó a usar en el mundo de la medicina y después se empezó a usar en el mundo del deporte una vez se había demostrado que esta reflejaba perfectamente el estado del SNA, lo que permitía a los preparadores físicos y entrenadores entender como el deportista asimilaba las diferentes cargas de entrenamiento y por tanto conocer su nivel de fatiga entre otros datos. En los inicios existía una variedad de protocolos e instrumentos de registro, análisis e interpretación de los parámetros de HRV, por lo que la asociación europea y americana de cardiología redactaron un manual en 1996 donde explicaban las recomendaciones relacionadas con la HRV (características del registro y su posterior análisis) (Task Force, 1996) proponiendo registros cortos con electrocardiograma (ECG) de una duración de 10 minutos, donde los 5 primeros minutos eran de estabilización (y no se analizaban) y los últimos 5 minutos eran los minutos que se analizaban. Posteriormente los avances tecnológicos con la aparición de los pulsómetros que podían medir el tiempo entre las ondas RR facilitaron la introducción de la HRV en el mundo del deporte ya que los registros se podían hacer en los domicilios de los deportistas o en los propios centros de entrenamiento sin requerir un aparataje sofisticado ni personal especializado. Estos registros todavía respetaban la duración de 10 minutos establecida por Task Force a pesar que la posición durante el registro era diferente entre los diferentes estudios. Los avances en la investigación como en la tecnología han provocado que medir la HRV tanto en el mundo amateur como profesional, sea, a día de hoy, un procedimiento rápido, económico, no invasivo y del que se obtienen datos muy fiables. Los avances tecnológicos, como la fotopletimografía que utilizan los *smartphones* (Plews y cols., 2017b), sensores de dedo (Esco y cols., 2017) o sensores asociados a dispositivos de muñeca han facilitado la aparición de nuevas aplicaciones informáticas (Ithlete®, HR4training®...). La reducción del tiempo de registro, que ha pasado de los 10 minutos que proponía Task Force a los registros ultra-cortos de alrededor de 1 minuto que existen actualmente ha sido un factor clave para la introducción de la HRV en el deporte, reduciendo así mucho el tiempo destinado al registro de todos los miembros de un equipo de fútbol. Esta reducción en el tiempo de registro da respuesta a una idea fundamental que tienen los preparadores físicos de deportes de equipo: para medir un parámetro es necesario que el registro sea fiable, sencillo y rápido. A continuación, se explican los diferentes aspectos relacionados con el registro, análisis e interpretación de la HRV.

Un objetivo del registro de la HRV en el fútbol profesional es estudiar y analizar los cambios a medio y largo plazo que se producen en el SNA como consecuencia de los diferentes entrenamientos y competiciones para conocer como cada futbolista está asimilando las cargas y sus niveles de fatiga. La utilización de la media semanal de los parámetros de HRV es otro factor relacionado con el protocolo de los registros que está totalmente aceptado entre los investigadores y los profesionales que usan la HRV (Plews y cols., 2014b). El motivo es que la interpretación del valor de un día concreto de HRV de manera aislada tiene un valor relativo ya que es fácilmente influenciado por factores internos como estrés, nervios, ingesta de café y también por factores externos como temperatura, hora y lugar de registro etc. Ante este escenario, Plews y cols. (2014a), Plews, Laursen, Stanley, Kilding y Buchheit (2013) y posteriormente, Flatt y Esco (2015) propusieron que para que la media semanal de RMSSD tuviera un valor fiable del estado del SNA, y poder así comprobar como afectaban las cargas de entrenamiento durante la semana, esta media debía de tener al menos 3 registros de RMSSD de 3 días diferentes en deportistas profesionales mientras que para deportistas amateurs debía estar formada por 5 registros de 5 días diferentes. La diferencia en el número de registros necesarios para poder interpretar el valor semanal de RMSSD entre deportistas profesionales y amateurs reside en que los deportistas profesionales cuentan con un nivel físico más alto, están más habituados a las cargas altas de entrenamiento y por ello presentan menos variaciones en el valor de RMSSD a diferencia de los deportistas amateurs que tienen un coeficiente de variación mayor entre los valores de RMSSD obtenidos en diferentes días.

1.1.5.1. Cuándo realizar el registro de la HRV. Los registros de la HRV se pueden realizar en diferentes momentos, en reposo (normalmente antes de realizar cualquier tipo de actividad física), durante el propio ejercicio físico o después del entrenamiento.

1.1.5.1.1 HRV en reposo. La HRV se puede registrar en reposo mientras el futbolista duerme, justo después de despertarse o en el centro de entrenamiento antes de empezar la sesión de entrenamiento. La actividad del SNA es muy sensible a las condiciones ambientales (ruido, temperatura, luminosidad) por lo que el registro de la HRV requiere que las condiciones durante este sean lo más parecidas posibles, aumentando la homogeneidad de las mismas y poder observar de una manera más precisa los efectos del entrenamiento sobre el SNA. Por ello, los registros por la noche durante el

período de sueño parecen ser teóricamente los que presentan unas condiciones más estandarizadas durante el registro (Pichot y cols., 2000). Sin embargo, parece difícil introducir registros de HRV de una manera asidua durante la fase de sueño en deportistas, y más concretamente en futbolistas profesionales. Algunas razones claras que puedan explicar esa dificultad son sin duda que los deportistas pueden olvidar ponerse los instrumentos de registro, la incomodidad de dormir con una cinta de un pulsómetro y sobre todo que los futbolistas puedan pensar que se está analizando aspectos de su vida privada (Stanley, Peake y Buchheit, 2013b). Bosquet, Papelier, Léger y Legros (2003) realizaron un registro largo de la HRV durante la fase de sueño en 9 atletas de resistencia usando un pulsómetro Polar (Polar Electro Oy, Kempele, Finlandia) para comprobar si un aumento de la carga de entrenamiento producía cambios en la actividad del SNA y así poder predecir estados de sobre-entrenamiento. En este estudio los autores concluyeron que el LF, HF y la ratio LF/HF analizados durante la fase de sueño no era un parámetro válido para detectar el sobre-entrenamiento.

Pichot y cols. (2000) realizaron un registro diario la HRV durante la fase de sueño en 7 corredores de resistencia usando un Holter (Stratascan 563, Del Mar Reynolds Medical) 2 veces por semana durante un período de 4 semanas de entrenamiento. Los autores comprobaron que las altas cargas de entrenamiento tenían una influencia clara en la actividad del SNA, reduciendo la actividad del SNAp y mostrando un predominio del SNAs. Finalmente, Boullosa y cols. (2013) realizaron registros largos de la HRV durante la fase de sueño en 8 futbolistas profesionales usando un pulsómetro Polar (Polar Electro Oy, Kempele, Finlandia) durante un período de 8 semana, con 4 registros por semana. Los autores comprobaron que los registros de HRV, (analizando SDNN, RMSSD, LF, HF, ratio LF/HF, SD1 y SD2) durante la fase de sueño era un sistema válido para comprobar los cambio producidos por el entrenamiento en el estado del SNA.

Otra opción para medir la HRV en reposo es la de realizarla justo al despertarse en casa del futbolista ya que esta ofrece también altas condiciones de homogeneidad. Sin embargo, parece irreal o muy difícil poder introducir 3-4 registros (como mínimo) por semana justo después de levantarse en cada futbolista que compone un equipo profesional durante un período medio o largo de tiempo (Buchheit, 2014; Plews y cols., 2014a). Al hecho de que los futbolistas puedan olvidar realizar el registro, se une el hecho que estos puedan realizarlo sin seguir las indicaciones de registro de una manera rigurosa. A pesar

de ello, algunos autores han medido la HRV a sus deportistas justo al despertarse en casa de estos (Plews y cols., 2014a; Plews y cols., 2012; Ravé y cols., 2018; Flatt, Esco y Nakamura, 2017a; Flatt y Esco 2016a; Cornforth, Campbell y Nesbitt 2015; Earnest y cols., 2004).

Por último, los registros en reposo en los centros de entrenamiento se han convertido en una alternativa válida para solucionar la situación previamente explicada. Ante este escenario, algunos autores han optado por realizar registros cortos de HRV en reposo en los centros de entrenamiento de cada equipo (Nakamura y cols., 2015; Hedelin y cols., 2000; Naranjo, De la Cruz, Sarabia, de Hoyo y Domínguez, 2015a; Naranjo, De la Cruz, Sarabia, de Hoyo y Domínguez, 2015b; Kiviniemi y cols., 2007; Pereira, Flatt, Ramirez, Loturco y Nakamura, 2016; Nakamura, Pereira, Abad, Franchini y Loturco, 2016; Edmonds, Sinclair, y Leicht, 2013; Esco, y Williford, 2011).

En conclusión, parece que medir la HRV en los centros de entrenamientos antes de desayunar y antes de empezar la sesión de entrenamiento parece ser la forma más práctica a la hora de llevar un seguimiento de las oscilaciones que se puedan producir en el SNA. Es evidente que al elegir realizar los registros en los centros de entrenamiento se puede perder cierto grado de homogeneidad en las condiciones de registro comparado con los registros realizados justo al levantarse en las casas de los jugadores, pero, por otro lado, los cuerpos técnicos se aseguran que realizan el número de registros que se quieren y siguiendo el protocolo de medición de una manera más rigurosa. Cabría destacar que tener valores diarios de HRV obtenidos en los centros de entrenamiento usando siempre el mismo protocolo de registro permite poseer datos fiables que permiten llevar un seguimiento individualizado de cómo afectan las cargas de entrenamiento a cada jugador porque siempre se mide en las mismas condiciones y de la misma manera (Naranjo y cols., 2015a).

1.1.5.1.2 HRV durante el ejercicio físico o entrenamiento. El registro y posterior análisis de la HRV durante el entrenamiento no se ha usado mucho en el mundo del deporte y menos aún en el fútbol profesional. Los estudios han mostrado como el registro de la HRV durante el ejercicio parece ser un concepto más científico que una herramienta práctica de análisis de los efectos que tiene el entrenamiento sobre el SNA (Buchheit, 2014). Una razón que puede explicar el poco uso es que se producen muchos artefactos

durante los registros debidos al movimiento del jugador, lo que a su vez requiere mucho tiempo por parte del técnico para eliminarlos y poder realizar un análisis correcto. Otra razón podría ser que el rendimiento o los diferentes ejercicios que componen un entrenamiento están influidos por numerosos factores, tanto del propio jugador (por ejemplo, motivación, estado físico) como externos a este (compañeros, entrenador o los propios ambientales) lo que dificulta que se puedan correlacionar cambios en la HRV con ejercicios o sesiones de entrenamiento (Iellamo y cols., 2002; Uusitalo y cols., 1998).

Algunos autores han estudiado la HRV al inicio de la sesión después de realizar una pequeña activación siempre a la misma intensidad para comprobar mediante el comportamiento de la frecuencia cardiaca el estado del SNA y ver así los niveles de fatiga (Al Haddad y cols., 2011; Buchheit, Medez-Vilanova, Quod, Poulos y Bourdon, 2010b). Thorpe y cols. (2016) realizaron registros cortos de HRV para intentar relacionar la HRV con la carga de entrenamiento diaria en futbolistas profesionales durante 17 días. Los jugadores realizaron 5 minutos de bicicleta a una intensidad de 130W e inmediatamente después se sentaron y se les midió la FC y la HRV durante 5 minutos usando un pulsómetro Polar (Polar Oy, Kempele, Finlandia). Por otro lado, Buchheit, y cols. (2010b) realizaron registros cortos de la FC y la HRV en jóvenes futbolistas durante 3 semanas. Los jugadores corrieron durante 5 minutos a una intensidad de 9km/h antes de iniciar el entrenamiento. Posteriormente los jugadores permanecieron sentados durante 5 minutos justo al acabar la carrera analizando sólo la HRV de los 3 últimos minutos de los 5 minutos que permanecieron sentados. Los autores comprobaron que la HRV era inversamente proporcional a la velocidad aeróbica máxima y que se necesitaban más investigaciones para determinar si cambios en la HRV después de realizar un calentamiento corto se podían relacionar con cambios en el nivel de fatiga.

1.1.5.1.3 HRV post ejercicio. Actualmente no se utiliza prácticamente en el fútbol profesional, a pesar del gran interés recibido en la década anterior. El motivo es que la HRV puede verse influenciada por numerosos y cambiantes factores del propio entrenamiento diario previo al cese del ejercicio (diferentes intensidades previas...) o por factores internos del jugador que hacen muy difícil poder relacionar cambios en la HRV con las diferentes cargas de entrenamiento.

1.1.5.2. Posición durante el registro de la HRV. Cuando el registro de la HRV se realiza en reposo, en el deporte tanto amateur como profesional, se ha realizado los registros en 3 posiciones diferentes; en posición supina (Earnest y cols., 2004; Mazon y cols., 2013), sentado (Ciprian, Laursen y Plews, 2015; Pereira y cols., 2016; Nakamura y cols., 2015) o en bipedestación (Hellard y cols., 2011; Schmitt y cols., 2015; Bourdillon y cols., 2017).

Respecto a la mejor posición para registrar la HRV no existe un consenso general y aceptado cuando se pretende medir a deportistas profesionales lo que provoca que se puedan encontrar numerosas investigaciones con diferentes posiciones de registro. Lo que si parece estar aceptado a nivel internacional es que la posición de bipedestación es la posición más adecuada cuando estemos registrando la HRV en deportistas con niveles muy altos de resistencia que tienen frecuencias cardíacas de reposo muy bajas (como por ejemplo fondistas, triatletas...). Al estar en bipedestación la FC en reposo aumenta y contrarresta la saturación del SNPP (Kiviniemi y cols., 2007). Tradicionalmente la HRV se ha registrado en posición supina siguiendo las pautas de registro de los inicios dictadas por Task Force (1996), pero todavía queda por determinar cual es la mejor posición de registro para los jugadores de deportes de equipo. Recientemente se está recomendando realizar registros en posición sentado por la comodidad para los jugadores.

En el caso del fútbol los registros de HRV se han realizado en varias posiciones; sentado (Buchheit, Simpson, Al Haddad, Bourdon y Mendez-Villanueva, 2012; Pereira y cols., 2016; Naranjo y cols., 2015a; Naranjo y cols., 2015b; Thorpe y cols., 2016; Proietti y cols., 2017) en posición supina (Flatt y Esco, 2015) o de sentado a de pie (Botek y cols., 2014; Botek, Krejčí, McKune y Klimešová, 2016). El hecho que no se realicen registros con tanta frecuencia en posición de bipedestación con futbolistas amateurs o profesionales reside en que los investigadores recomiendan realizar registros en posición de pie solo con atletas con niveles de resistencia muy altos. Los futbolistas tienen niveles de resistencia medios comparados con fondistas, triatletas etc. Otra razón para no realizar registros en bipedestación en el fútbol profesional es para intentar estandarizar los registros y por comodidad. Sería difícil de conseguir que un futbolista pudiera permanecer de pie entre 2-5 minutos sin moverse. Los registros en posición supina o sentado son mucho más cómodos para el jugador y se han convertido en una alternativa válida consiguiendo unos niveles de estandarización mayores en el registro que las realizadas en

posición de bipedestación. En la práctica los registros con futbolistas profesionales se realizan en los centros de entrenamiento y la posición más usada normalmente es la de sentado (Thorpe y cols., 2016) aunque algunos estudios la han realizado en posición supina. Uno de los motivos puede ser que al realizar el registro sentado se puede contrarrestar la saturación del SNAp en el caso que los jugadores tengan niveles de resistencia muy altos y con la posición de sentado los preparadores físicos se aseguran que se tienen en cuenta las características físicas individuales de todos los jugadores cuando registran la HRV (jugadores con niveles de resistencia medio y altos) ya que los valores de HRV en posición supina podrían tal vez perder exactitud con los jugadores con valores muy altos de resistencia. Lo importante durante el registro ya sea sentado o en posición supina es que el jugador no se mueva, hable o reciba estímulos externos para así no alterar los valores de frecuencia cardíaca, teniendo en cuenta que los valores de HRV se ven afectados por cambios en la FC y, como se ha dicho anteriormente, en la posición.

Flatt y Esco (2015) registraron el valor de RMSSD a un grupo de jugadoras de fútbol en posición supina y sentada usando la aplicación Ithlete®. Estos descubrieron que la media semanal de RMSSD se podía obtener de una manera precisa con 3 registros por semana cuando la posición de medida era la posición supina, mientras que recomendaban 5 registros a la semana cuando se medía en posición de sentado para obtener datos precisos de la media semanal. Los autores también comprobaron como la media semanal obtenida en 3, 5 y 7 días en posición supina era más sensible a los cambios en las cargas de entrenamiento que la obtenida en posición de pie (Flatt y Esco, 2016b). Estas afirmaciones coinciden con las de Plews y cols. (2014a) que comprobaron que la media semanal de RMSSD de atletas de resistencia de élite obtenida con 3 registros en posición supina presentaba una correlación muy alta con la media semanal de RMSSD obtenida con los 7 días de registro de la semana. Recientemente, se ha recomendado hacer registros en posición de sentado ya que se obtienen coeficientes menores de variación de los distintos registros respecto a los registros realizadas de pie y también por otro lado el hecho de estar sentado puede contrarrestar el efecto de saturación del SNAp (Stanley y cols., 2013; Buchheit, 2014).

1.1.5.3. Duración del registro y del tiempo de estabilización. Actualmente no hay un consenso totalmente aceptado sobre la duración mínima que deben tener los registros ultra-cortos de HRV ni tampoco del tiempo mínimo de estabilización previo a

estos registros. Cabe destacar que en la medida en que los protocolos de registro tengan un tiempo de registro menor, la duración del tiempo de estabilización adquirirá una mayor importancia. La razón para explicar esta afirmación reside en que para obtener un valor real y objetivo de RMSSD el deportista necesita un tiempo mínimo para que su FC se estabilice antes de realizar el registro. Si el tiempo de registro es por ejemplo de 5 minutos, el tiempo de estabilización previo al registro tiene un peso menor ya que con una duración de 5 minutos más el período de estabilización aplicado, el jugador tiene suficiente tiempo para que se estabilicen sus valores de FC durante el registro. En cambio, si el registro tiene una duración de 1 minuto o menos es muy importante que haya un tiempo mínimo de estabilización previo al registro que garantice que la FC esté estable para poder obtener valores válidos. Flatt y Esco (2016b) comprobaron que 1 minuto de estabilización era suficiente para que los valores de RMSSD obtenidos con un registro ultra-corto de 1 minuto de duración tuvieran una correlación aceptable con los 5 minutos finales analizados de un total de 10 minutos registrados. Para ello registraron el RMSSD en 20 atletas de resistencia universitarios en posición supina y comprobaron como los primeros 5 intervalos de 1 minuto de duración tenían altas correlaciones con los últimos 5 minutos usados como criterio. Los autores justificaron la estabilidad en el primer minuto analizado con el tiempo que se había usado para la preparación del electrocardiograma y que había servido como tiempo de estabilización.

Recientemente, Krejčí, Botek y Mckune (2018) han demostrado como el tiempo de estabilización previo necesario para realizar registros ultra-cortos de RMSSD de un minuto de duración es diferente entre deportistas de resistencia y estudiantes universitarios. Esta investigación demuestra diferencias entre sujetos entrenados y sujetos no entrenados, y a su vez pone de manifiesto que el tiempo previo de estabilización cuando se realizan registros ultra-cortos de 1 minuto de duración es diferente según las características de los sujetos sobre los que se realice la medición y pueda ser diferente entre deportistas de diferentes modalidades o niveles de rendimiento. Este hecho demuestra la importancia de uno de los objetivos de esta tesis doctoral que reside en descubrir el tiempo mínimo de estabilización que se necesita en futbolistas profesionales cuando se realizan registros ultra-cortos de RMSSD de 1 minuto de duración.

Durante mucho tiempo, los registros de HRV han tenido una duración de 10 minutos siguiendo las directrices de Task Force (1996). Estos registros cortos, de 10

minutos (5+5) de HRV eran demasiado largos para que se pudieran introducir a diario tanto en deportes individuales, pero, sobre todo, en los deportes de equipo, debido al largo tiempo que se necesita para registrar a todos los miembros de un equipo. Algunos autores comprobaron como los registros ultra-cortos, alrededor de 1 minuto de duración, con 1 minuto previo para la estabilización, presentaban correlaciones muy altas con los valores obtenidos en los registros cortos de 10 minutos (Flatt y Esco, 2013; Esco y cols., 2017; Flatt y cols., 2017a; Plews y cols., 2017b). Esco y Flatt (2014) comprobaron en 23 atletas universitarios que a medida que se reducía la duración del registro de 60'' a 30'' y 10'' en posición supina se reducía la correlación del valor obtenido de LnRMSSD con el valor del LnRMSSD de los 5 minutos analizados y considerados como período referencia o criterio. Los autores recomendaron que las mediciones ultra-cortas debían de ser de 1 minuto con 1 minuto previo de estabilización.

No obstante, a pesar de que existe una clara tendencia a la utilización de registros ultra-cortos, no existe aún un consenso claro en cuanto a la duración mínima y tiempo de estabilización mínimo que garantice la validez del registro. A continuación, se enumeran varias investigaciones que muestran la variedad de tiempos de registro y estabilización usados en los últimos años y que manifiestan esa falta de consenso comentada anteriormente.

Esco y Flatt (2014) propusieron que 1 minuto de estabilización era suficiente para la registros ultra-cortos de 1 minuto de HRV. En otro estudio. Esco, Flatt y Nakamura (2017) comprobaron la validez de registros de 1 minuto con 1 minuto previo de estabilización. Los autores demostraron en 30 estudiantes universitarios que el LnRMSSD de 5 minutos de duración con 5 minutos previos de estabilización mostraba resultados similares a los obtenidos con 1 minuto de estabilización y 1 minuto de registro en 3 posiciones (supino, sentado, bipedestación). En otro estudio con nadadores, Flatt y cols. (2017c) realizaron registros en posición sentada de 1 minuto de duración y 1 minuto previo de estabilización y comprobaron que RMSSD era sensible a los cambios en las cargas de entrenamiento en un período de 5 semanas y que era un parámetro útil para decidir las cargas a aplicar a los nadadores. A diferencia de los artículos anteriores, Bourdillon y cols. (2017) propusieron la validez de 1 minuto de estabilización previo, pero comprobaron que la duración del registro debía ser de 2 minutos en 3 atletas de nivel

internacional para obtener datos fiables de RMSSD en la posición de sentado y bipedestación.

Existen también muchos estudios en los que la duración del registro ultra-corto varía el tiempo de estabilización o de registro expuesto previamente. Plews y cols. (2017a) analizaron el LnRMSSD con el objetivo de mostrar adaptaciones positivas a diferentes cargas de entrenamiento en 4 remeros de elite durante 7 semanas realizando registros de 1 minuto en posición supina justo después de despertarse, pero solo estando 30 segundos previos de estabilización. (0,5+1). Unos años antes, Plews y cols. (2012) registraron el LnRMSSD en 2 triatletas profesionales durante 9 semanas analizando los últimos 5 minutos de un total de 6 (lo que significa que usaban 1 minuto de estabilización previo) en posición supina con el objetivo de mejorar el proceso de entrenamiento. Otra investigación que muestra la variedad en la duración del registro y del período previo de estabilización es el realizado por Bellenger y cols. (2016) que registraron la HRV en 15 triatletas ante diferentes tipos de entrenamiento durante 4 semanas registrando 3 minutos en posición supina y de pie (el tiempo de estabilización no se especifica).

En el caso concreto del fútbol no existe tampoco un protocolo aceptado sobre la duración en los registros ni en el tiempo de estabilización previo al registro que se necesita para analizar la HRV. Prueba de ello es la gran variedad que existe en ambos parámetros de registro (duración y período previo de estabilización) en los estudios publicados hasta la actualidad. La mayoría de estudios llevados a cabo en fútbol profesional se han realizado con registros cortos y tiempos de estabilización de 5 o más minutos mientras que los estudios usando registros ultra-cortos y períodos de estabilización de 1 minuto son escasos. A continuación, se enumeran algunos artículos en los que se puede apreciar esta disparidad en los protocolos.

Boullosa y cols. (2013) registraron la HRV en 8 jugadores profesionales durante 3 horas de sueño. Thorpe y cols. (2016) realizaron registros de 5 minutos durante 3 semanas en posición sentado después de realizar carrera a baja intensidad. Naranjo y cols. (2015a) midieron solo 1 vez por semana la HRV en un equipo profesional con registros cortos de 10 minutos durante una temporada. Vilamitjana y cols. (2014) realizaron 1 registro corto de HRV de 10 minutos de duración a la semana (el día de partido) durante 5 meses, con 17 jugadores. (siendo los primeros 5 minutos usados como estabilización y

analizando sólo los últimos 5 (5+5). Buchheit y cols. (2012) realizaron registros cortos de 5 minutos en jóvenes futbolistas de élite después de realizar 5 minutos de carrera a 9km/h. Proietti y cols. (2017) examinaron la HRV en 3 equipos profesionales realizando registros cortos de 10 minutos, tomando los primeros 5 minutos de estabilización y los últimos 5 minutos para el análisis de la HRV. Finalmente, Ravé y Fortrat (2016) realizaron registros cortos de 10 minutos en posición supina y de 7 minutos en posición de pie. Algunos autores han realizado registros ultra-cortos de 1 minuto de estabilización y 1 minuto de duración. Estos se han realizado sobre todo en fútbol femenino (Flatt y Esco, 2016a; Flatt y Esco, 2015; Flatt y cols., 2017a).

A pesar de la falta de un consenso a cerca de la duración y tiempo de estabilización, cabe destacar que la aparición de los registros ultra-cortos ha ayudado a solucionar el problema fundamental del tiempo que tienen los técnicos cuando quieren medir cualquier parámetro en un equipo de fútbol. Realizar registros frecuentes en fútbol profesional de cualquier parámetro requiere que el tiempo empleado para ello sea bajo ya que si es alto los técnicos no pueden realizar el registro de ese parámetro con tanta frecuencia, aunque sepan que ese valor es útil para ello. Los preparadores físicos buscan que el proceso de registro tenga un equilibrio entre el tiempo empleado y grado de información obtenida.

Estos también buscan que el proceso sea simple y sencillo y que no requiera de un análisis posterior muy costoso para obtener la información. Los registros ultra-cortos realizados con diferentes aplicaciones han ayudado para que haya aumentado el número de equipos profesionales que usan la HRV dentro de sus procesos de control de cargas y control de fatiga ya que permiten medir a 1 jugador en 2-5 minutos dependiendo de la aplicación y protocolo de registro que se use. Algunas de las aplicaciones y programas de registro de la HRV más populares en el mundo amateur o profesional son Ithlete®, HR4training®, Elite HRV®, Firstbeat® o Omegawave®.

1.1.6 Métodos de análisis de la HRV

Existen diferentes métodos para analizar HRV que permiten a su vez obtener diferentes parámetros. Los métodos más utilizados son los que se basan en el dominio del tiempo, en el dominio de la frecuencia y las variables no lineales. Los parámetros que se

han analizado de la HRV han ido cambiando con el paso del tiempo. Cada parámetro evalúa una característica del SNA, reflejando unos la actividad del SNAs mientras que otros reflejan la actividad del SNAp (Task Force, 1996) En un principio la HRV se analizaba usando los métodos de frecuencia (ratio baja frecuencia/alta frecuencia..), tiempo y no lineales (SD1, SD2) pero con el paso del tiempo y las investigaciones que se han realizado, los investigadores han llegado a la conclusión que el parámetro de tiempo RMSSD es el parámetro más recomendable a la hora de analizar el SNA. Algunas razones que explican la recomendación de usar RMSSD residen en que este se puede medir con registros cortos o ultra-cortos, no se ve afectado por la respiración (Penttilä y cols., 2001; Silva, de Oliveira, Silveira, Tavares Mello y Deslandes, 2015), no requiere ningún software especializado para su cálculo (Buchheit, 2014) ya que se puede calcular con una hoja Excel, y las variaciones diarias son más pequeñas que las que tienen otros parámetros de la HRV (Al Haddad y cols., 2011). Finalmente, los cambios en RMSSD se han relacionado con la actividad vagal y se han usado como un indicador de la respuesta del deportista a las diferentes cargas de entrenamiento, mostrando buena o mala asimilación hacia ellas (Le Meur y cols., 2013; Schmitt y cols., 2013). A continuación, se explican los 3 métodos de análisis de la HRV.

1.1.6.1 Métodos basados en el dominio de tiempo. Definimos las variables de tiempo como los diferentes parámetros estadísticos que resultan del registro electrocardiográfico de los intervalos RR normales. Estos intervalos RR normales son analizados estadística y matemáticamente para obtener los distintos parámetros.

El método de tiempo quizá sea uno de los más simples de analizar (figura 4). En un electrocardiograma, cada complejo QRS es detectado y los intervalos RR o la frecuencia cardíaca son determinados fácilmente. Las variables de tiempo que pueden ser calculadas incluyen la media del intervalo de RR, la frecuencia cardíaca media, la diferencia entre el intervalo más corto y largo de RR, la diferencia entre la frecuencia cardíaca por la noche y por el día etc.

Los parámetros de tiempo más utilizados por la comunidad científica son:

- RR (ms): intervalo entre intervalos RR en milisegundos.
- Mean HR (latidos): frecuencia cardíaca media.
- Mean RR (ms): duración media de todos los intervalos RR.

- SDNN (ms): desviación estándar de todos los intervalos RR.
- SDANN (ms): desviación estándar de la media de los intervalos RR en todos los segmentos de los 5 minutos del registro.
- RMSSD (ms): es la raíz cuadrada del valor medio de la suma de las diferencias al cuadrado de todos los intervalos RR sucesivos.
- SDNN index (ms): media de las desviaciones estándar de todos los intervalos RR durante todos los segmentos de los 5 minutos de registro.
- pNN50%: porcentaje de intervalos RR consecutivos, que discrepan entre si en 50 milisegundos.

Time-Domain Results

Variable	Units	Value
Mean RR*	(ms)	1023.1
STD RR (SDNN)	(ms)	35.9
Mean HR*	(beats/min)	58.65
Min/Max HR	(beats/min)	53.32/66.93
RMSSD	(ms)	23.7
NNxx	(beats)	5
pNNxx	(%)	2.3
RR triangular index		9.727
TINN	(ms)	164.0

Figura 4: Ejemplo de un informe de análisis de un período concreto de tiempo de un archivo RR con el método de tiempo. Obtenido con el programa Kubios® (versión 3.0.0) (Heart Rate Variability software, Kuopio, Finland).

1.1.6.2. Métodos basados en el dominio de frecuencias. La medida del espectro de frecuencias de la HRV se obtiene a partir de una transformación matemática, habitualmente la transformada de Founier, aunque existen otros métodos, que permiten descomponer la energía (potencia) de la señal RR en diferentes componentes frecuenciales (Rodas y cols., 2008). Estos componentes se correlacionan con los diferentes componentes del SNA. De esta forma, la mayor parte de la potencia de la señal se encuentra en un margen de 0 a 0,4 Hz (figura 5).

El análisis de frecuencias se suele realizar en medidas electrocardiográficas de cortos periodos de tiempo (aproximadamente 5 minutos o equivalentes de 2 minutos) donde se analizan los picos de las diferentes frecuencias que se observan (obviamente también se pueden realizar análisis de frecuencias en periodos más largos de hasta 24h.). El registro completo se realiza con el sujeto en decúbito supino y posteriormente se valora

la evolución del espectro de frecuencias y de los diferentes parámetros cuando se pasa de la posición en decúbito a la de semiincorporado o en bipedestación. Por regla general, el hecho de ponerse de pie o de semiincorporarse implica un aumento del valor de LF (considerado mediado por el SNAs) y una disminución del valor de HF (mediado por el SNAp). Los parámetros más destacados de frecuencia son:

- TP (*total power*) (ms^2): Potencia total. Este parámetro se considera el espectro general. Es la varianza de todas las componentes de los intervalos RR inferiores a 0,4 Hz.
- ULF (*ultra low frequency*) (ms^2): Abarca el rango de frecuencias inferiores a 0,003 Hz. Son más visibles en periodos largos de medida (24 horas) y se han asociado de manera muy significativa con el parámetro SDNN de la variable de tiempo.
- VLF (*very low frequency*) (ms^2): Este rango de frecuencias (0,003 a 0,04 Hz) muy bajas muestran las influencias hormonales, termorreguladoras etc.
- LF (*low frequency*) (ms^2): El rango de frecuencias se sitúa entre 0,04 y 0,15 Hz. El valor de frecuencias puede atribuirse a influencias del SNAs y/o a las del SNAp. De todas maneras, según diferentes estudios, parece ser que en registros a largo plazo nos proporciona más información sobre la actividad del SNAs. Las influencias del SNAp se dan cuando existe una frecuencia respiratoria baja (inferior a 7 ciclos/min.).
- HF (*high frequency*) (ms^2): Se encuentran situadas entre 0,15 y 0,4 Hz. La HF está claramente relacionada con la actividad del SNAp y tiene un efecto relacionado con la disminución de la FC. La frecuencia respiratoria también juega un papel importante en la influencia sobre este espectro de frecuencia. Cuando cambia la frecuencia respiratoria de manera destacable también cambia el pico de HF, demostrando la importancia de la frecuencia respiratoria en la HF.
- Ratio LF/HF: Es la ratio entre las bajas frecuencias y las altas frecuencias. Con esta ratio se puede estimar la influencia del SNAp (relacionada con la relajación y las HF) y la del SNAs (relacionada con el stress y las LF). Así podemos estimar el equilibrio simpático-vagal.

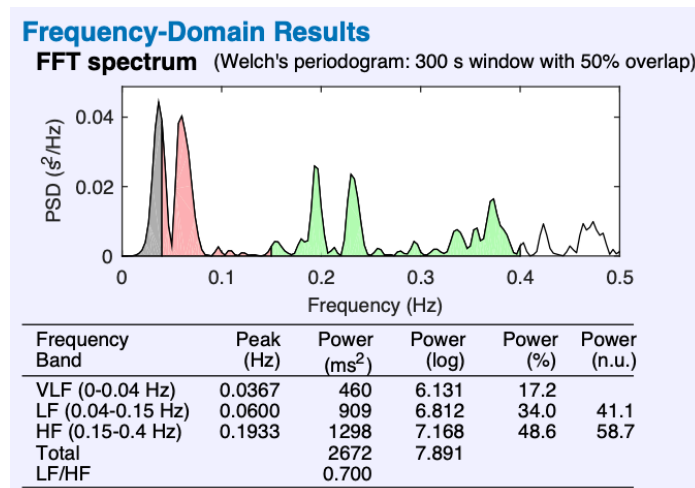


Figura 5: Ejemplo de un informe de análisis de un período concreto de tiempo de un archivo RR con el método de dominio de frecuencias. Obtenido con el programa Kubios® (versión 3.0.0) (Heart Rate Variability software, Kuopio, Finland).

1.1.6.3. Métodos no lineales. Los fenómenos no lineales están ciertamente involucrados en el origen de la variabilidad de la frecuencia cardiaca (figura 6). Estos están determinados por interacciones complejas de hemodinámica, electrofisiológica, así como por regulaciones nerviosas centrales y autónomas. Se ha especulado que el análisis de la HRV basado en los métodos de dinámica no lineal podrían obtener información valiosa para la interpretación fisiológica de la HRV y para la evaluación del riesgo de muerte súbita. Para su representación, se ha utilizado la sección de Poicaré. Los parámetros no lineales no son lo suficientemente sensibles para detectar perturbaciones no lineales del intervalo RR que serían de importancia fisiológica o práctica

Los parámetros no lineales más utilizados son:

- SD1 (ms): Desviación estándar de los intervalos ortogonales de los puntos RR al diámetro transversal de la elipse. Su valor refleja la actividad del SNAp.
- SD2 (ms): Desviación estándar de los intervalos ortogonales de los puntos RR al diámetro longitudinal de la elipse.

Nonlinear Results

Variable	Units	Value
Poincare Plot		
SD1	(ms)	343.9
SD2	(ms)	378.0
SD2/SD1		1.099
Approximate Entropy (ApEn)		0.583
Sample Entropy (SampEn)		0.570
Detrended Fluctuation Analysis (DFA)		
Short-term fluctuations, α 1		0.564
Long-term fluctuations, α 2		0.204

Figura 6: Ejemplo de un informe de análisis de un período concreto de tiempo de un archivo RR con el método no lineal. Obtenido con el programa Kubios® (versión 3.0.0) (Heart Rate Variability software, Kuopio, Finland).

1.1.7 Interpretación de los diferentes parámetros de HRV y FC

Antes de explicar los diferentes cambios que se pueden producir en la FC y en la HRV asociado diferentes tipos o cargas de entrenamiento, es necesario resaltar que la edición de los archivos RR tiene una importancia crucial para obtener valores precisos de HRV. La presencia de un solo artefacto en los intervalos RR, puede alterar hasta en un 50% el valor obtenido de HRV en un registro de 5 minutos (Thorpe y cols., 2015). La edición de los archivos RR se puede realizar mediante programas específicos como Kubios® (versión 3.0.0) (Heart Rate Variability software, Kuopio, Finland). Este programa ofrece varias intensidades de corrección de artefactos en el archivo, desde intensidades bajas a intensidades más altas. Dependiendo de la intensidad de filtrado elegido el valor de HRV varía (figura 7,8 y 9). Normalmente se utiliza un filtrado de intensidad media, así nos aseguramos que los artefactos menores o mayores de un cierto valor no distorsionan el valor final, eliminando así los valores que se encuentran en los extremos. Esta comprobación/eliminación de los artefactos de los archivos RR requiere un tiempo mínimo por archivo. Lo ideal sería que se realizara una revisión y corrección de los artefactos de cada archivo registrado, pero parece difícil en la práctica que un cuerpo técnico de un equipo de fútbol pueda revisar (y editar en caso que sea necesario) un gran número de archivos RR diariamente. Este problema de tiempo se ha solucionado gracias a los avances en la tecnología y la aparición de nuevas aplicaciones que han permitido que esa corrección de artefactos sea corregida automáticamente por las propias aplicaciones que usan los entrenadores o preparadores físicos para el registro de ondas RR. Hay que tener en cuenta que las opciones de filtrado de las diferentes aplicaciones

pueden ser diferentes (por ejemplo, la aplicación Ithlete® elimina todos los artefactos que tienen una duración menor de 500ms o mayor de 1800ms) lo que puede dificultar la comparación de datos de HRV obtenidos con diferentes apps. A continuación, se muestran 3 ejemplos de análisis de un archivo RR usando el dominio de tiempo para observar cómo el tipo de filtrado de corrección de artefactos afecta a los diferentes valores de RMSSD para un mismo archivo RR. Finalmente, hay que tener en cuenta que cuánto más artefactos tenga el archivo, mayores serán las diferencias.

Time-Domain Results

Variable	Units	Value
Mean RR*	(ms)	874.5
STD RR (SDNN)	(ms)	526.0
Mean HR*	(beats/min)	68.61
Min/Max HR	(beats/min)	53.61/98.85
RMSSD	(ms)	559.0
NNxx	(beats)	91
pNNxx	(%)	58.0
RR triangular index		17.556
TINN	(ms)	2509.0

Figura 7. Ejemplo de parámetros obtenidos con el método de análisis de dominio de tiempo de un archivo RR sin aplicar ningún filtro para corregir los artefactos. Análisis y corrección realizada con el Programa Kubios® (versión 3.0.0) (Heart Rate Variability software, Kuopio, Finland).

Time-Domain Results

Variable	Units	Value
Mean RR*	(ms)	1054.4
STD RR (SDNN)	(ms)	36.1
Mean HR*	(beats/min)	56.91
Min/Max HR	(beats/min)	53.32/66.20
RMSSD	(ms)	24.3
NNxx	(beats)	3
pNNxx	(%)	1.9
RR triangular index		9.875
TINN	(ms)	157.0

Figura 8. Ejemplo de parámetros obtenidos con el método de análisis de dominio de tiempo de un archivo RR aplicando un filtro medio para corregir los artefactos. Análisis y corrección realizada con el Programa Kubios® (versión 3.0.0) (Heart Rate Variability software, Kuopio, Finland).

Time-Domain Results

Variable	Units	Value
Mean RR*	(ms)	1053.8
STD RR (SDNN)	(ms)	37.1
Mean HR*	(beats/min)	56.94
Min/Max HR	(beats/min)	53.32/66.20
RMSSD	(ms)	24.7
NNxx	(beats)	3
pNNxx	(%)	1.9
RR triangular index		9.294
TINN	(ms)	163.0

Figura 9. Ejemplo de parámetros obtenidos con el método de análisis de dominio de tiempo de un archivo RR aplicando un filtro fuerte para corregir los artefactos. Análisis y corrección realizada con el Programa Kubios® (versión 3.0.0) (Heart Rate Variability software, Kuopio, Finland).

¿Qué parámetros de HRV y como interpretarlos?

En primer lugar, es necesario recordar que los valores de HRV son individuales, lo que dificulta la comparación de valores entre jugadores, ya que existe una gran variación interindividual, aún incluso siendo de las mismas características de edad, género, nivel deportivo. Por otro lado, los valores de HRV del jugador durante la semana suelen oscilar dependiendo de las cargas de entrenamiento que reciben. Es importante comentar que el valor de HRV el día de partido o día previo a este suele descender. Estas disminuciones se pueden deber a la tensión de la propia competición (Buchheit, 2014; Plews, Laursen y Buchheit, 2017a). Otro aspecto a tener en cuenta según algunos autores (Buchheit, 2014; Plews, Laursen y Buchheit, 2017a) es que, para interpretar de una manera correcta los diferentes valores de HRV con el objetivo de controlar la asimilación de las cargas de entrenamiento, se debería analizar la media semanal de HRV, obtenida esta con un mínimo de 3 registros semanales en deportistas profesionales y 5 registros en deportistas amateurs (Plews y cols., 2014b). La HRV puede verse influenciada por numerosos factores ajenos al entrenamiento lo que provoca que no se recomiende analizar e interpretar los efectos del entrenamiento o asimilación de cargas teniendo en cuenta sólo un valor aislado de un día en concreto ya que el valor de ese día podría llevar a conclusiones erróneas o confusiones; de hecho, existe incluso una gran variación diaria en los valores en un mismo sujeto (Buchheit, 2014; Plews y cols., 2013). Otra idea básica es que el valor de HRV se debería combinar con otros parámetros de carga externa o interna para poder tener una visión global del jugador y poder analizar así con más exactitud como está asimilando las diferentes cargas y cual es su nivel de fatiga.

Cuando se mide y analiza la HRV en un futbolista a medio y largo plazo, es necesario que sus valores se combinen con otros parámetros como la FC en reposo, y que las variaciones que manifiesta la HRV se estudien teniendo en cuenta el coeficiente de variación de RMSSD y el *smallest worthwhile change* o cambio mínimo significativo (CMS) de RMSSD (tabla 1). Estos parámetros amplían el significado del valor de HRV y permiten interpretar de una manera más clara y adaptada a las características de un/a deportista de élite y cómo este deportista está asimilando las cargas de entrenamiento o cuales son sus niveles de fatiga a nivel del SNA y si se pueden interpretar los cambios como significativos para un/a deportista de élite.

El primer valor que se ha de combinar con el valor de RMSSD es el valor de FC en reposo. En la tabla 1 se explica las diferentes combinaciones de RMSSD junto a FC en reposo que hay dependiendo de si sus valores aumentan o se reducen y la interpretación que se puede hacer de estas combinaciones. Estas combinaciones permitirán al preparador físico entender e interpretar correctamente como están afectando las diferentes cargas de entrenamiento en el atleta.

Tabla 1

Interpretación de los cambios en RMSSD y frecuencia cardíaca.

Cambios en RMSSD	Cambios en FC reposo	Posibles mecanismos	Interpretación práctica
Aumenta	Disminuye	Incremento actividad SNAp	Asimilación correcta de cargas entto.
Aumenta	Aumenta	Incremento de la actividad SNAs	1. Si ocurre durante cortos períodos de entrenamiento, buena disposición para competir. 2. Si no, fatiga acumulada.
Disminuye	Aumenta	Incremento de la actividad SNAs	1. Si ocurre durante la fase de <i>tapering</i> , buena disposición para competir 2. Si no fatiga acumulada.
Disminuye	Disminuye	Aumento de la actividad del SNAp que causa la saturación	1. En atletas con gran experiencia, asimilación correcta de las cargas. 2. Si se prolonga y no cambian con un período de <i>tapering</i> puede indicar sobre-entrenamiento.

Nota: Modificada de Buchheit (2014). RMSSD: raíz cuadrada del valor medio de la suma de las diferencias al cuadrado de todos los intervalos RR sucesivos; FC: frecuencia cardíaca; SNAs: sistema nervioso autónomo parasimpático; SNAp: sistema nervioso autónomo simpático. Entto: entrenamiento.

En segundo valor, el coeficiente de variación semanal (CV_{semanal}) es otro parámetro esencial, junto a la RMSSD y la FC en reposo, para entender como asimila el jugador las diferentes cargas de entrenamiento (tabla 2). Su uso y combinación con los otros dos, permite realizar un análisis más profundo y exhaustivo de la HRV. Se obtiene dividiendo la desviación típica (SD) de la RMSSD de la semana por el promedio de RMSSD de esa semana.

$$CV_{\text{semanal}} \text{ de RMSSD} = \text{SD de RMSSD semanal} / \text{promedio de RMSSD semanal}$$

El CV se recomienda usarlo cuando los valores semanales de RMSSD y FC son muy similares varias semanas seguidas. EL CV permite entender al preparador físico como las diferentes cargas de entrenamiento han afectado al jugador, ya que CV altos muestran que las cargas de entrenamiento han producido un efecto en el jugador mientras que CV bajos sugieren que las cargas no han tenido efecto de fatiga en el jugador (Esco y Flatt 2014). Por ejemplo, si un futbolista presenta varias semanas un valor similar de HRV, pero los CV_{semanal} de RMSSD son altos se puede decir que las cargas de entrenamiento son correctas y están teniendo un efecto en el jugador.

El CV_{semanal} refleja de una manera numérica las fluctuaciones diarias de RMSSD que se han producido a lo largo de una semana de entrenamientos y permite entender cuál ha sido la respuesta del organismo del jugador ante las diferentes cargas (Flatt y Esco, 2016a). Schmitt y cols. (2013) descubrieron como atletas de élite de resistencia que presentaban síntomas de fatiga manifestaban valores de HRV más bajos y CV más altos que los atletas que no presentaban síntomas de fatiga. Estos autores sugieren que la fatiga aumentaba la actividad del SNAs lo que descendía los valores de HRV. Por otro lado, Buchheit y cols. (2010b) observaron un CV de RMSSD semanal más alto en jóvenes futbolistas con un menor nivel físico durante un período de entrenamiento de 3 semanas. Estos dos artículos son 2 ejemplos de que los deportistas con un menor nivel físico tendrán un CV de RMSSD más alto ya que cualquier carga les va a provocar una modificación de su estado de homeostasis y por tanto cambios en los valores de RMSSD. En cambio, deportistas con un mayor nivel físico presentaran valores de CV de RMSSD menores ya que sufren menos oscilaciones en la HRV. El CV en posición supina presenta unos valores más bajos que el CV en posición de pie. A continuación, se explican las

posibles combinaciones del valor semanal de RMSSD con el valor semanal del CV de RMSSD y su interpretación práctica.

Tabla 2

Interpretación práctica de diferentes combinaciones de valores de RMSSD_{semanal} en relación con su CV_{semanal}.

Cambios en RMSSD semanal	Cambios en CV _{semanal} de RMSSD	Interpretación Práctica
Se mantiene estable	Aumenta	Las cargas de entrenamiento se están asilando correctamente y tienen un efecto positivo
Se mantiene estable	Disminuye	Las cargas de entrenamiento no suponen un estrés para el jugador.
Disminuye	Aumenta	Muestra que la recuperación es inadecuada ante las cargas de entrenamiento.

Nota: Modificada de Esco y Flatt (2014).

Finalmente, los preparadores físicos o entrenadores no debemos olvidar el parámetro de cambio mínimo significativo cuando se hace un seguimiento de la evolución de la HRV en el tiempo o de cualquier otro parámetro de rendimiento o percepción subjetiva de bienestar de un futbolista de élite. A veces los jugadores aumentan o disminuyen un poco diferentes valores de bienestar o rendimiento, pero es necesario saber si esos pequeños cambios son significativos o no. El CMS es muy útil en el análisis de la HRV, sencillo de usar y clave para el control individualizado de los niveles de fatiga de cada jugador. Hopkins (2000) recomienda multiplicar 0,2 por la desviación estándar de los registros para calcular el CMS en los deportes de equipo. Concretamente, en el caso de RMSSD, se debería multiplicar 0,2 por la desviación estándar de los registros del período de tiempo que se quiere analizar. A continuación, se resta o suma el resultado de esta multiplicación al promedio de RMSSD formando una zona llamada de “confort” por encima y por debajo del promedio de RMSSD. Todos los valores que con el tiempo excedan o no lleguen a este intervalo significan cambios mínimos significativos en un futbolista de élite y como tales se deberán tener en cuenta. En la figura 10 se pueden

observar los valores semanales de RMSSD de un futbolista profesional a lo largo de una temporada con las zonas de CMS de cada mes.

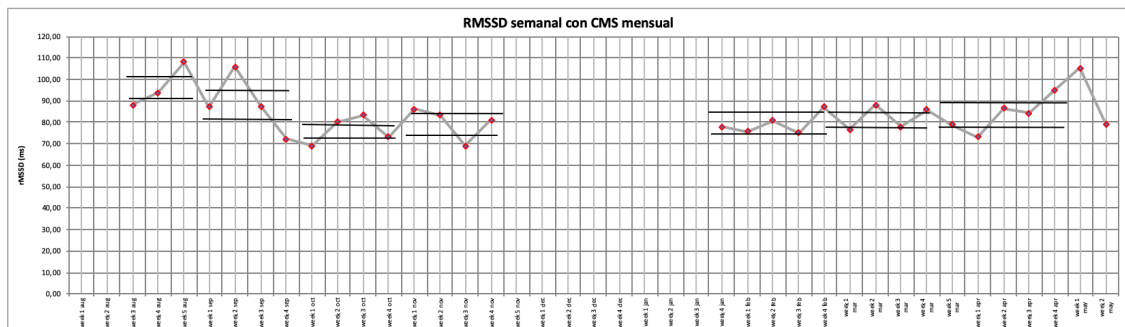


Figura 10. Ejemplo de la variación de RMSSD durante una temporada de un futbolista profesional. Elaboración propia.

Finalmente, también se han utilizado en menor medida otros parámetros que combinan varios valores como el Stress Score (Naranjo y cols., 2015) o el Ratio RMSSD/RR (Plews y cols., 2017a). Plews y cols. (2017a) comprobaron que el RMSSD semanal de atletas de élite de deportes individuales y de resistencia aumentaba en unos o disminuía en otros antes de una competición tras haber entrenado con cargas muy altas, justo en el período previo a la competición. Es necesario recordar que estas modalidades deportivas permiten incrementar o disminuir mucho las cargas de entrenamiento en el tiempo ya que las competiciones están muy separadas en el tiempo a diferencia de los deportes de equipo donde se compite semanalmente y las cargas de entrenamiento son muy similares entre sí durante los distintos microciclos. Ante esta situación que disminuía o aumentaba el valor de RMSSD, los autores comprobaron que el rendimiento se relacionaba con los valores de HRV cuando estos aumentos o descensos en los valores de RMSSD se combinaban con el intervalo RR. Los autores propusieron usar el valor de RMSSD junto al Ratio RMSSD/ RR y certificaron que disminuciones en el valor de RMSSD semanal e incrementos en la ratio RMSSD/RR indicaban estado de fatiga mientras que disminuciones del valor de ambos indicaba que le atleta presentaba un estado óptimo para rendir en la competición.

Por otro lado, en el fútbol profesional, Naranjo y cols. (2015) analizaron la HRV de un equipo de fútbol profesional realizando 1 registro corto de 10 minutos de duración a la semana durante los 9 meses del período competitivo. Estos autores propusieron el

término stress score y una nueva ratio. El stress score se calcula: $\text{Stress score} = 1000 * 1 / \text{SD2}$ y la ratio simpático/parasimpático se calcula: $\text{Ratio} = \text{Stress Score} / \text{SD1}$. Los autores certificaron que estos 2 nuevos índices eran útiles para interpretar los cambios de la HRV en futbolistas de élite.

1.2. Carga de entrenamiento en fútbol

Impellizzeri, Rampini y Marcora (2005) definen la carga de entrenamiento como el volumen, densidad e intensidad de la suma de estímulos que conforman el entrenamiento.

El control de las cargas de entrenamiento es primordial en fútbol para periodizarlas y planificarlas, para asegurarse de que cada jugador recibe las cargas que necesita en cada momento concreto, para reducir el riesgo de sufrir una lesión y para asegurarse que los deportistas están en las condiciones óptimas de rendir en la competición y no presentan estados de fatiga que les impidan rendir al máximo (Little y Williams, 2007).

No obstante, la cuantificación de la carga presenta dificultades para los entrenadores, ya que la recolección, control e interpretación de los resultados requieren de un alto grado de capacitación y a veces el uso de equipamiento sofisticado en la realización de los registros (Halsen, 2014a). El control de la carga de un deportista se puede estudiar mediante valores obtenidos desde un punto de vista externo al jugador o desde un punto de vista interno (tabla 3). La carga de entrenamiento externa se puede definir como el trabajo completado por el deportista, medido independientemente de sus características internas. Generalmente se evalúa el trabajo realizado desde un punto de vista motor (distancias recorridas, aceleraciones, etc.) Un ejemplo en el fútbol de carga externa sería los metros recorridos por un jugador, o los metros recorridos a alta intensidad en una sesión de entrenamiento. Por otro lado, la carga interna evalúa los efectos fisiológicos y psicológicos provocados por la actividad sobre el sujeto, tales como: distancia recorrida, velocidad, aceleraciones, etc. Por lo tanto, parece claro que la combinación de parámetros de carga interna y externa es necesaria para entender como el futbolista asimila las diferentes cargas de entrenamiento (Schwellnus y cols., 2016).

En la actualidad se pueden utilizar números parámetros tanto de carga externa como interna que se pueden observar en la tabla 3.

Tabla 3

Parámetros e instrumentos para medir la carga externa y la carga interna.

Tipo de carga	Ejemplos de medición
Carga externa	<p>Tiempo entrenamiento o competición (segundos, minutos, horas, días.</p> <p>Frecuencia entrenamiento o competición (sesiones o partidos por día, semana, mes)</p> <p>Tipo de entrenamiento o competición.</p> <p>Análisis del movimiento, GPS, (distancia total, distancia recorrida a diferentes velocidades, aceleraciones, saltos...)</p> <p>Función neuromuscular (test de salto, uso de enconder...)</p> <p>Ratio carga aguda/crónica</p>
Carga interna	<p>RPE</p> <p>FC, FC recuperación, TRIMP.</p> <p>Ratio FC/RPE</p> <p>Concentraciones de lactato en sangre</p> <p>Ratio lactato en sangre/ RPE</p> <p>Análisis del sueño (duración y calidad)</p> <p>Valoraciones hormonales, bioquímicas y del sistema inmunológico</p> <p>Tests psicológicos (POMS), escala ansiedad en el deporte (SAS), cuestionario de recuperación-estrés para deportistas (RESTQ-Sport), escala de recuperación total (TQR), cuestionario de compromiso al ejercicio (CtES)</p>

Nota: Modificada de Schwellnus y cols. (2016).

1.2.1. *Carga interna*

La carga interna en los deportes de equipo, y por tanto en fútbol, se ha cuantificado con mucha frecuencia usando la FC (Lucia, Hoyos, Pérez y Chicharro, 2000) y las escalas de percepción subjetiva de esfuerzo (RPE) (Foster y cols., 2001). En los últimos años se han producido diversos avances tecnológicos que han permitido poder estudiar más parámetros de la carga interna de un futbolista como por ejemplo el análisis de sueño, la tensiomiografía etc. que han facilitado a los preparadores físicos entender de una manera más exacta como las diferentes cargas de entrenamiento afectan al jugador (Little y Williams, 2007).

Los primeros cuerpos técnicos que empezaron a cuantificar la carga interna de sus jugadores usaban las escalas subjetivas de esfuerzo percibido (RPE) que habían desarrollado Borg, Hassmén, y Lagerström (1987). La aparición de los pulsómetros unos años más tarde, permitió incorporar la FC como un parámetro más de carga interna de los futbolistas ya que los jugadores llevaban los pulsómetros durante las sesiones de entrenamientos y partidos amistosos, ya que no ha sido hasta hace pocos años cuando se ha permitido usar pulsómetros en partidos oficiales.

A continuación, se desarrollan los medios más utilizados para el control de la carga interna en el proceso de entrenamiento en fútbol

1.2.1.1. Frecuencia cardíaca (FC). La frecuencia cardíaca ha sido usada como un medio para controlar la intensidad del esfuerzo durante la práctica deportiva ya que muestra una correlación muy alta con el consumo de oxígeno (Drust, Reilly y Cable, 2000). Asimismo, la frecuencia cardíaca también puede dar información sobre la principal vía metabólica utilizada para la producción de energía durante la actividad.

Hay distintitos métodos para cuantificar la carga de entrenamiento usando la FC, entre los que destacamos el TRIMP (*Training Impulse*). El TRIMP relaciona en una ecuación la FC (que hace referencia a la intensidad) y la duración del ejercicio (que representa el volumen) y se obtiene un valor que se refiere a la carga que ha tenido un entrenamiento. El método TRIMP se ha modificado por varios autores a lo largo del tiempo. A continuación, se explican algunos de ellos.

1.2.1.1.1 TRIMP Banister. El TRIMP de Banister (1991) ha sido utilizado por numerosos profesionales en el campo del fútbol profesional como un método sencillo y eficaz para el control de la carga interna de los jugadores. (Halsón, 2014; Akubat, Patel, Barrett y Grant, 2012; Scott, Lockie, Knight, Clark y de Jong, 2013). El TRIMP de Banister relaciona en una ecuación la duración del entrenamiento, frecuencia cardíaca máxima, frecuencia cardíaca en reposo y frecuencia cardíaca promedio durante la sesión de ejercicio. La ecuación es la siguiente:

$$\text{TRIMP} = \text{Duración (min)} \times (\text{Factor A} \times (\text{FC media} - \text{FC Reposo}) \times \exp(\text{Factor B} \times (\text{FC media} - \text{FC Reposo}))$$

Para hombres el factor A= 0,64 y el Factor B= 1,92 y para mujeres el factor A: 0,86 y el Factor B= 1,67.

1.2.1.1.2 TRIMP de Edwards. Edwards (1994) modifico el TRIMP inicial dividiendo la FC en 5 zonas diferentes según el % de la frecuencia cardíaca máxima (tabla 4). Una vez divididas esas zonas se calcula el tiempo que el jugador ha pasado en cada uno de las zonas y se multiplica por un factor de ponderación calculando así la carga interna que ha supuesto una sesión para un jugador. A continuación, se muestra la tabla de TRIMP de Edwards.

Tabla 4

TRIMP de Edwards.

% FC _{máx}	Zona
50-60%	1
60-70%	2
70-80%	3
80-90%	4
90-100%	5

Nota: Modificada de Edwards (1994). %FC_{máx}: Porcentaje de la frecuencia cardíaca máxima.

1.2.1.2 Escala de percepción subjetiva de esfuerzo (RPE). La RPE es un método muy usado en la actualidad para medir la carga interna que ha supuesto un entrenamiento o una competición, tanto en el deporte en general como en el fútbol en concreto, después que se hayan demostrado correlaciones muy altas entre los resultados obtenidos del RPE con otros parámetros de carga interna como la FC y carga externa como el GPS (Haddad, Stylianides, Djaoui, Dellal, y Chamari, 2017; Impellizzeri, Rampinini, Coutts, Sassi y Marcora, 2004; Casamichana, Castellano, Calleja, San Román, y Castagna, 2013; Gómez, Jimenez y Ruiz, 2011; Borresen y Lambert, 2008).

Otro motivo importante para usar RPE en fútbol es que el RPE aporta al preparador físico una información más global del estrés provocado por la carga de entrenamiento ya que cuando el jugador responde sobre la intensidad de la sesión tiene en cuenta el aspecto fisiológico y el psicológico.

En los inicios el RPE ideado por Borg estaba constituido en un rango de 0 a 20 (Borg, 1962). Unos años más tarde Foster y cols. (2001) modificaron, simplificaron y validaron la escala de percepción subjetiva de Borg estableciendo 10 niveles de intensidad lo que facilitaba que los deportistas pudieran dar respuestas más precisas al reducir el rango de posibilidades. También estos autores cambiaron algunos términos para que fuera más fácil diferenciar las intensidades que había tenido el entrenamiento. La carga de entrenamiento usando RPE (expresada en unidades arbitrarias (UA)) se calcula multiplicando el valor obtenido en la escala por la duración de la sesión en minutos.

El uso de la RPE se basa en la idea que el propio deportista pueda valorar de una manera simple el estrés fisiológico y psicológico que ha tenido un determinado ejercicio o entrenamiento en él de una manera subjetiva. El método basado en el esfuerzo percibido parece una solución interesante y se ha propuesto como un método simple, no invasivo y económico para monitorizar la carga de entrenamiento (Al Haddad y cols., 2017; Impellizzeri y cols., 2004).

En fútbol existen numerosos estudios que correlacionan positivamente el RPE con marcadores de carga interna. Alexiou y Coutts (2008) registraron el RPE de 15 jugadoras de élite junto a la FC (TRIMP de Banister) durante 16 semanas, recogiendo 40 datos de sesiones y partido de media por jugadora. Los autores encontraron una correlación de ($r=0,85$) entre el RPE y el TRIMP de Banister. Impellizzeri, Rampinini, Coutts, Sassi y Marcora (2004) monitorizaron a 19 jugadores jóvenes durante 7 semanas. Los jugadores respondían después de cada sesión de entrenamiento el RPE, registrando un total de 479 sesiones de entrenamiento individuales. Los autores certificaron que el RPE es un indicador válido de control de la carga de entrenamiento interna, ya que presentaba correlaciones altas con los parámetros de FC.

Por otro lado, Moalla y cols. (2016) también comprobaron en 14 futbolistas profesionales durante 16 semanas que los datos obtenidos del RPE se correlacionaban positivamente con valores de carga de entrenamiento como la FC. Gómez, Jiménez y Ruiz (2011) combinaron parámetros de carga interna y externa de 13 sesiones de entrenamiento de 22 futbolistas profesionales. Los autores comprobaron como el RPE era un parámetro sencillo y fiable que reflejaba la carga interna del futbolista. Finalmente, Thorpe y cols. (2016) usaron en su investigación el RPE en 29 futbolistas profesionales

durante 4 semanas para calcular la carga de los entrenamientos siendo el día de partido el valor más alto de la semana.

1.2.2. Carga externa

Matveyev (1977) define la carga externa como aquellas características cuantitativas que pueden ser evaluadas desde el punto de vista motor por indicadores externos como la duración, número de sesiones, velocidad de ejecución, ritmo, etc. La alteración del organismo como consecuencia de un estímulo está asociada a un volumen e intensidad del entrenamiento que también puede ser cuantificado desde el punto de vista externo (Raposo, 2000). Hay distintos métodos para cuantificar la carga de entrenamiento externa. A continuación, exponemos algunos de ellos.

1.2.2.1 GPS (sistema de posicionamiento global). Los sistemas GPS se han convertido en una herramienta muy popular y útil para monitorizar la carga externa tanto en los entrenamientos como en los partidos de competición en el fútbol. Antes que se permitiera el uso del GPS en partidos oficiales los cuerpos técnicos obtenían información sobre la carga externa que suponía la competición para cada jugador a través de sistemas de video como por ejemplo el Prozone. Hace unas temporadas se empezó a permitir usar los GPS en partidos oficiales.

El uso del GPS en el fútbol ha permitido a los cuerpos técnicos obtener información objetiva y fiable de lo que hace un jugador durante un partido o entrenamiento convirtiéndose en una herramienta fundamental a día de hoy para conocer la carga externa en el fútbol profesional y poder así individualizar las cargas de entrenamiento durante la semana (Akenhead, Harley y Tweddle, 2016). El GPS ofrece valores de diferentes parámetros, pero parece ser que la distancia a alta intensidad, ratio aceleraciones-desaceleraciones, esprints, son algunos de los parámetros más usados. Hay que tener en cuenta que la fiabilidad del control de las distancias recorridas mediante el uso del GPS puede disminuir en altas velocidades (Coutts y Duffield, 2010) si no se utilizan instrumentos de última generación con una frecuencia de muestreo elevada. Una ventaja del GPS es que se puede configurar para crear diferentes umbrales de velocidad individualizados para cada jugador. Así podemos saber cuántos metros ha recorrido un jugador a alta intensidad, (entre 21-24 km/h), andando etc.

Como se ha mencionado en el párrafo anterior, los GPS actuales ofrecen información relativa a las aceleraciones y desaceleraciones. Las aceleraciones provocan una demanda neuromuscular alta que es imprescindible tener en cuenta a la hora de cuantificar la carga externa de un entrenamiento en un jugador (Akenhead y cols., 2016). Por ejemplo, autores como Casamichana, Castellano, Calleja, San Román y Castagna (2013) proponen a la hora de cuantificar la carga externa que la aceleración se empiece a contabilizar cuando se alcance un pico de al menos 2 m/s^2 y que se tiene que estar al menos con una aceleración de 2 m/s^2 durante medio segundo.

1.3. La fatiga en el fútbol

1.3.1. Definición

El fútbol es un deporte de cooperación-oposición de carácter intermitente, está determinado por la alternancia de esfuerzos realizados a diferentes intensidades con periodos de recuperación que varían. Los jugadores han de tener un nivel condicional alto para poder rendir satisfactoriamente (Castagna, y cols., 2009).

El termino fatiga se ha usado y definido en muchos artículos científicos. Por ejemplo, Halson (2014a) y Knicker, Renshaw, Oldham y Cairns (2011) definen la fatiga como la imposibilidad de poder mantener la potencia o intensidad requerida. Estos últimos proponen que el mejor test de fatiga seria realizar un test de rendimiento máximo.

Fitts (1977) define la fatiga como un descenso agudo de rendimiento que incluye un aumento en el esfuerzo percibido para ejercer una fuerza y/o una reducción en la capacidad de ejercer fuerza muscular máxima.

Reilly (1994) define la fatiga en fútbol como una reducción en la producción de fuerza o potencia que esta asociada a un ejercicio sostenido en el tiempo y que se manifiesta en una reducción de rendimiento.

Para Nédélec y cols. (2012) la fatiga que sufre un futbolista después de un partido de fútbol está causada por varios factores, como la deshidratación, la depleción de glucógeno, el daño muscular y la fatiga mental.

La fatiga en fútbol tiene un origen multifactorial lo que dificulta su monitorización. Esta puede estar influenciada por el tipo de estímulo, tipo de contracción, duración, frecuencia e intensidad del ejercicio, tipo de músculo implicado, así como también por las características del entrenamiento o partido y finalmente también por los factores ambientales (Halsen, 2014a). La fatiga después de un partido de fútbol es multifactorial y se relaciona principalmente con deshidratación, agotamiento de glucógeno y fatiga central (Nedélec y cols., 2013). Por lo tanto, interpretar la fatiga que aparece durante o después de un partido es altamente complejo, aunque está claro que la fatiga se produce hacia el final de los partidos, así como temporalmente durante el juego, independientemente del nivel y posición en el campo del jugador.

1.3.2 Tipos de fatiga

Si se presta atención al origen de la fatiga en fútbol se puede decir que existen 2 tipos; la fatiga central y la fatiga periférica o muscular (Terrados, Calleja y Xelling, 2010; Minett y Duffield, 2014). La fatiga central hace referencia a las alteraciones en el funcionamiento del sistema nervioso central, específicamente en el funcionamiento cerebral que puede ocurrir en varios niveles de las estructuras nerviosas que intervienen en la actividad física provocando a su vez una alteración en la transmisión desde el SNC o un control motor reducido para reclutar unidades motoras disponibles. En este tipo de fatiga existe una reducción en la contracción máxima voluntaria, afectando la cadena de mando de la contracción muscular. Estos factores se extienden desde el nivel cortical a la unión neuromuscular, que producen una disminución en la capacidad del sistema nervioso central para enviar la señal a la unión neuromuscular (Amann, 2011). La fatiga periférica o muscular se relaciona con un cambio bioquímico que limita la capacidad del músculo de producir fuerza y puede estar causada por múltiples factores (Weir, Beck, Cramer, y Housh, 2006).

Por otro lado, es importante tener en cuenta la fatiga mental en el fútbol y en el deporte en general cuando se analiza el estado del jugador y su rendimiento.

La fatiga mental es un estado psicológico, caracterizado por sentimientos de cansancio y falta de energía y está provocada por períodos prolongados de actividad cognitiva elevada y exigente. Diversos estudios han demostrado como la fatiga mental

reduce el rendimiento físico y cognitivo. Esta reducción en el rendimiento se ha atribuido a un enfoque de atención alterado y a reacciones más lentas y menos precisas (Boksem, Theo, Meijman y Lorist, 2005; Lorist, Boksem, y Riddenrinkhof, 2005; Dunca, Fowler, George, Joyce, y Hankey, 2015).

En los últimos años, diversos autores han demostrado como la fatiga mental afecta negativamente al rendimiento físico en situaciones de laboratorio muy controladas, pero se han obtenido resultados contradictorios cuando se evaluaban los efectos de la fatiga mental sobre el rendimiento físico en situaciones reales de fútbol.

Las demandas perceptivas-cognitivas en el fútbol son muy altas. Los jugadores deben permanecer alerta durante períodos prolongados de tiempo, prestando atención a todo lo que sucede a su alrededor y seleccionando aquella información que es útil para ellos en cada momento concreto para tomar las mejores decisiones (Smith, y cols., 2018)

Smith y cols. (2016) comprobaron que la distancia recorrida durante el test Yo-Yo Intermittent Recovery Test Nivel 1 disminuyó en 12 futbolistas amateurs que previamente habían sido expuestos durante 30 minutos a una tarea de evaluación de la capacidad cognitiva (la tarea de Stroop), la cual requiere un nivel atencional muy alto. Esta disminución se correlacionó con una percepción subjetiva alta del esfuerzo. Por otro lado, Badin, Smith, Conte y Coutts (2016) investigaron los efectos de la fatiga mental en el rendimiento físico durante las tareas de 5 contra 5 + 2 porteros y 6 contra 6 + 2 porteros. Sólo uno de los equipos había realizado una tarea previa exigente a nivel mental. Los resultados obtenidos con GPS demostraron que las distancias recorridas por ambos equipos eran muy similares. En lo que sí hubo diferencia entre los equipos fue en la percepción subjetiva de esfuerzo que fue superior en el equipo que había sido previamente fatigado a nivel mental.

Respecto al rendimiento técnico-táctico ofensivo y defensivo, diversos estudios demuestran como la fatiga mental reduce la precisión en las diferentes acciones. Smith y cols. (2016) observaron como 12 jugadores amateurs, previamente fatigados mentalmente realizando durante 30 minutos la tarea de Stroop, disminuyeron su rendimiento táctico, aumentando la velocidad en la toma de decisiones y reduciendo la precisión en ella.

1.3.3 Fases de la fatiga

Si prestamos atención al momento que aparece la fatiga se pueden diferenciar dos fases, la fase de fatiga aguda y la fase de fatiga crónica. La fatiga aguda provoca una disminución del rendimiento causada por el propio entrenamiento o competición. Esta fase es necesaria para que se puede conseguir uno de los principios del entrenamiento como es el de supercompensación. Por otro lado, la fatiga crónica puede aparecer con el paso del tiempo, provocando un estado de fatiga permanente que puede provocar una disminución del rendimiento e incluso llegar a un estado de sobre-entrenamiento. Esta fatiga crónica suele aparecer con el tiempo cuando hay un desequilibrio entre las cargas de entrenamiento que recibe un jugador y su capacidad para asimilarlas, es decir, existe un desequilibrio entre carga y recuperación (Davis y Bailey, 1997; Meeusen, y cols., 2013). La fatiga es un proceso funcional transitorio reversible y se considera un mecanismo de defensa del cuerpo para prevenir la superación de los límites del organismo (Nielsen, de Paoli y Overgaard, 2001; Rampinini, y cols., 2011).

1.3.4. Causas de la fatiga

Los mecanismos que reducen la capacidad de poder rendir al máximo en fútbol no se entienden con total exactitud. Parece que después de períodos cortos de alta intensidad en ambas mitades, la fatiga está relacionada con las alteraciones en la homeostasis iónica dentro de la célula muscular y con una alteración de la excitación del sarcolema. En la fase inicial de la segunda mitad la fatiga está relacionada con una temperatura muscular más baja en comparación con el final de la primera mitad, y la fatiga que aparece al final del partido se relaciona con bajas concentraciones de glucógeno (Davis y Bailey, 1997).

La aparición de fatiga temporal durante el ejercicio de alta intensidad está relacionada con una acumulación de potasio en el intersticio muscular, y parece ser que no se relaciona con el lactato muscular alto, la acidosis muscular alta o la creatina muscular baja (Mohr, Krstrup y Bangsbo, 2005). La idea de que la acumulación de lactato y la reducción en el pH causa fatiga en el fútbol puede cuestionarse, ya que como demuestra Krstrup y cols. (2006) la cantidad de lactato acumulado durante un partido es pequeña si lo comparamos con otras modalidades deportivas. Las concentraciones de

lactato durante o después de un partido oscilan entre 7-9 mmol. Después de un período muy intenso del partido se han observado descensos en el pH muscular pero este descenso no se ha podido correlacionar con descensos en la distancia recorrida en sprint (Krustrup y cols., 2006). Por otro lado, la acumulación de potasio extracelular puede perjudicar la excitación del sarcolema (despolarizar el potencial de la membrana muscular) y reducir así la producción de fuerza (Mohr, y cols., 2005).

Otro mecanismo para explicar la fatiga muscular es la acumulación de fosfato inorgánico que se ha asociado a una reducción en la fuerza muscular en gran parte debido a la inhibición del consumo de calcio por parte del retículo sarcoplasmático (Waldron y Highton, 2014). La fatiga que se observa hacia el final de los partidos si se ha correlacionado con un descenso de glucógeno muscular y con una cierta deshidratación (Edwards y cols., 2007).

La aparición de fatiga después de un partido de fútbol también se ha relacionado con un agotamiento del almacenamiento de glucógeno muscular (Mohr y cols., 2005) lo que provoca una reducción en la producción de fuerza. Krustrup y cols. (2006) observaron que antes de los partidos los futbolistas tenían prácticamente la totalidad de fibras musculares repletas de glucógeno, encontrando un valor significativamente inferior después de los partidos. La capacidad para poder rendir en condiciones óptimas y volver a llenar los depósitos de glucógeno muscular muestra una lenta recuperación que oscila entre 48-72 horas (Krustrup y cols., 2011; Gunnarsson y cols., 2013). Esta lenta recuperación parece ser causada por la presencia de un elevado daño muscular (elevada concentración en plasma de creatinquinasa) y también por la respuesta inflamatoria (Nedélec y cols., 2012). Heisterberg y cols. (2013) mostraron que ciertos tipos de leucocitos aumentaron más durante la temporada que durante una pretemporada lo que refleja el estrés fisiológico que supone jugar múltiples partidos.

Otros factores como la deshidratación y la hipertermia también influyen en la aparición de la fatiga aguda en el fútbol (Reilly, 1997) Se ha observado que los jugadores de fútbol pierden hasta 3 litros de líquido durante los partidos disputados en ambientes con una temperatura suave mientras que pueden llegar a perder entre 4-5 litros cuando el partido se disputa en ambientes cálidos y húmedos (Bangsbo, 1994). Además, también se ha observado que la función cognitiva se mantiene mejor durante 90 minutos de ejercicio

continuo cuando se suministra líquido a los jugadores. Durante un partido de fútbol, la temperatura promedio del jugador puede variar entre 39.0 y 39.5°C (Nybo y Nielsen, 2001; Mohr, Krstrup y Bangsbo, 2003) mientras que la temperatura muscular es 0.5–1°C más baja relacionándose este hecho con la fatiga central. La fatiga central también podría ser un factor inherente en el juego, siendo importante hacia el final del juego y estando relacionada con un deterioro de la capacidad física. Es obvio que la fatiga central deteriora el rendimiento técnico, la precisión y velocidad de toma de decisiones, (Smith y cols., 2016) pero no hay consenso científico sobre cuál es el efecto de la fatiga central en el rendimiento físico (Rampinini y cols., 2011; Badin, Smith, Conte y Coutts, 2016).

Finalmente, las variables situacionales del partido hay que tenerlas en cuenta a la hora de analizar la aparición la fatiga. Los futbolistas profesionales regulan sus esfuerzos físicos de acuerdo con las demandas específicas de cada partido y durante los distintos períodos del juego.

En el fútbol, los jugadores pueden jugar entre 50-80 partidos por temporada teniendo períodos de alta congestión competitiva con 3 partidos a la semana durante varias semanas seguidas de la temporada (Mohr y cols., 2016). Durante estos períodos de alta congestión competitiva en la que los jugadores tienen 3-4 días entre partidos, estos pueden llegar a no conseguir la restauración de los valores normales de homeostasis (Andersson, Ekblom y Krstrup, 2008; Ekstrand, Waldém y Häggglund 2004; Magalhaes y cols., 2010).

Se ha observado una fatiga mayor después del partido disputado en la mitad de la semana comparado con los valores de fatiga postpartido de los otros dos partidos. Este hecho puede deberse a que este partido se juega normalmente con sólo 3 días de recuperación (Mohr y cols., 2016). El hecho de jugar partidos con una recuperación incompleta puede provocar un estado de fatiga agudo o crónico que se traduce en un descenso de rendimiento físico o en un mayor numero de lesiones.

El nivel de fatiga experimentado por un jugador en un momento dado, es poco probable que refleje puramente la carga incurrida de la actividad del día anterior, sino más bien la carga acumulada de los entrenamientos de los días anteriores. De hecho, el ejercicio de alta intensidad y la actividad de tipo excéntrico conduce a aumentos en el

dolor muscular que puede estar presente hasta 72 horas después del ejercicio (Fatouros, y cols., 2010).

La carga de entrenamiento a la que se somete el jugador no es el único elemento causante de una posible fatiga. De este modo, la alteración de bienestar o el incremento de la fatiga podría estar alterado, en algunas ocasiones, por variables relacionadas con la propia planificación del equipo, el calendario, horario, día de la semana o estrategias de recuperación (Moalla y cols., 2016) y variables más contextuales como el resultado de partido, importancia del próximo partido, posición en la competición, (Armstrong y Vanheest, 2002; Saw, Main y Gatin, 2016).

La importancia del control de la fatiga es imprescindible para otorgar a los deportistas un correcto equilibrio entre el estrés ocasionado por el entrenamiento/competición y una recuperación suficiente que provocará adaptaciones en el organismo y mejoras en el rendimiento en la competición.

La distancia recorrida ha sido profundamente analizada como un indicador de fatiga. Se ha demostrado que la distancia recorrida por los jugadores es menor en la segunda mitad que en la primera mitad de un juego (18% menos) independientemente de la posición de juego (Bradley, Di Mascio, Dan Peart, Olsen y Sheldon, 2010). Además, la distancia recorrida para realizar actividades de alta intensidad puede ser un 20% menor en los últimos 15 minutos que en los primeros 15 minutos del partido, independientemente de la posición de juego (Bradley y cols., 2009). Además, la distancia total cubierta en diferentes intensidades en la primera mitad puede influir significativamente en la distancia recorrida en la segunda mitad (Rampinini y cols., 2007) y puede tener un impacto significativo en la recuperación inmediatamente después de los períodos de 5 minutos más intensos de la segunda mitad (Sparks, Coetzee y Gabbett, 2016).

La disminución en la distancia recorrida a alta intensidad inmediatamente después del período más intenso de 5 minutos puede ser de alrededor del 8% siendo mayor en atacantes y defensores centrales, en comparación con otras posiciones de juego (Bradley y Noakes, 2013). La individualización de los umbrales de carrera de alta velocidad de

acuerdo con la condición física de cada jugador parece ser un buen indicador para observar la aparición de fatiga (Carling, Bradley, McCall y Dupont, 2016).

Otros parámetros de rendimiento físico como la capacidad de salto o de realizar un sprint se han usado también como indicadores de fatiga. Inmediatamente después de un partido se ha observado una reducción en la velocidad en sprint (Rampinini y cols., 2011; Heisterberg y cols., 2013) y de la capacidad de salto. A pesar que el rendimiento físico disminuye durante el transcurso de un partido de fútbol, parece que los jugadores pueden mantener sus habilidades técnicas a pesar de la fatiga (Carling y Dupont, 2011).

1.3.5 Marcadores de fatiga

En el fútbol el estado de fatiga del jugador ha sido evaluado desde distintas perspectivas. La figura 11 muestra como para conocer la fatiga se han utilizado parámetros de rendimiento anaeróbico, aeróbico, de agilidad, así como parámetros de descanso y bienestar a través de distintos cuestionarios psicológicos y psicobiológicos, así como también parámetros de rendimiento técnico y parámetros metabólicos (Polito, y cols., 2017). De ellos, cabe destacar la HRV y la escala de percepción de bienestar (Hooper, Mackinnon, Howard, Gordon, y Bachmann, 1995).

1.3.5.1 HRV en fútbol. En el punto 1 de esta tesis se han explicado todos los aspectos relacionados con la HRV y se ha demostrado de una manera clara con numerosos ejemplos que la HRV es un parámetro que permite analizar el equilibrio entre el SNAs y el SNAp, y por lo tanto conocer como el futbolista asimila las distintas cargas de entrenamiento y competición y conocer así sus niveles de fatiga.

1.3.5.2 Escala de percepción subjetiva de bienestar. El cuestionario de Hooper (Hooper, Mackinnon, Howard, Gordon y Bachmann, 1995) fue validado inicialmente en natación y posteriormente utilizado en fútbol. El cuestionario de Hooper aporta información subjetiva del estado de bienestar del jugador, contestando a preguntas sobre la calidad de sueño, el grado de estrés, la fatiga y el daño muscular. El cuestionario comprende valores de 1 a 7 para cada una de las 4 preguntas y se recomienda que se responda antes del entrenamiento o partido para que la respuesta no este influenciada por como le ha salido el entrenamiento o como ha jugado el jugador en el partido. El Índice

de Hooper se obtiene de sumar los 4 valores obtenidos en cada una de las escalas. Este cuestionario representa un método fiable basado en cuestionarios de auto análisis en relación al bienestar del deportista (Smith y cols., 2016). Fessi y cols. (2016) consideran el cuestionario de percepción subjetiva de bienestar un medio útil para conocer el estado de los deportistas debido a su facilidad de uso, a que no es invasivo y a su practicidad para obtener un feedback inmediato por parte de los deportistas y que permite conocer a los cuerpos técnicos de los equipos como los jugadores están asimilando las cargas de entrenamiento y sus niveles de fatiga. Buchheit y cols. (2013) registraron los resultados proporcionados por 18 jugadores de fútbol australiano. Los jugadores respondieron a diario durante 2 semanas de pretemporada el cuestionario de bienestar y los autores concluyeron que esta escala era sensible a las oscilaciones en las cargas de entrenamiento que se administraban a los jugadores.

Saw, Main y Gastin (2016) concluyeron que las medidas subjetivas son más apropiadas y sensibles para conocer el efecto provocado por el entrenamiento y/o la competición que las medidas objetivas. Además, los autores atribuyeron una triple ventaja al uso de indicadores subjetivos: es fácil de usar, no requiere ningún coste económico y es sensible a la realidad del jugador.

Finalmente, Thorpe y cols. (2015) y después Thorpe y cols. (2016) usaron los cuestionarios de percepción subjetiva de bienestar en 15 y 29 futbolistas profesionales, respectivamente. Los autores combinaron el uso de los cuestionarios con parámetros de carga interna como la FC o la HRV y parámetros de carga externa como distancia a alta velocidad. Los autores comprobaron como los valores obtenidos en el cuestionario de percepción subjetiva eran sensibles a las oscilaciones diarias en el volumen total de metros a alta intensidad. Thorpe y cols. (2016) también relacionaron los valores obtenidos mediante el RPE con los datos de las escalas de percepción subjetiva de bienestar comprobando que los cuestionarios de bienestar eran más sensibles a mostrar las oscilaciones semanales de carga que los parámetros de FC. Como conclusión, los autores observaron que las escalas de percepción subjetiva de bienestar son un método simple, económico, fácil de administrar y fiable para monitorizar el nivel de fatiga de futbolistas profesionales.

Igual que en las escalas subjetivas de esfuerzo (RPE) propuestas anteriormente, (diseñadas para medir la carga interna de entrenamiento) es necesario un periodo de familiarización en las escalas subjetivas de bienestar (diseñadas para medir la fatiga y recuperación) por parte de los jugadores con el objetivo de aumentar la eficacia del mismo (Nedélec y cols. (2012).

Algunos factores como la frecuencia de la administración, el tiempo necesario para completar las preguntas, la sensibilidad del cuestionario, el tipo de respuesta requerida, la hora del día en que se responde y el cuestionario que se implementa, deben de ser considerados previamente antes de administrar el cuestionario al deportista (Halsón, 2014a).

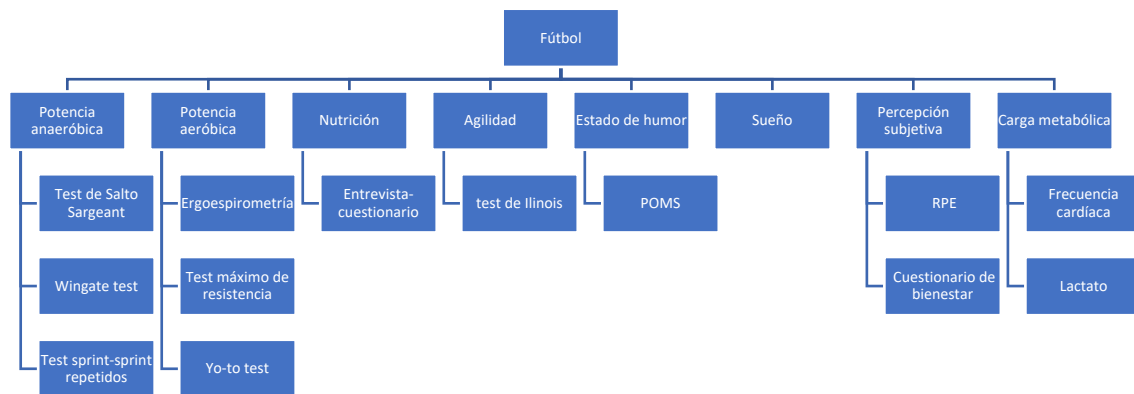


Figura 11. Principales instrumentos para controlar la fatiga fisiológica y psicológica en fútbol. Modificada de Polito y cols. (2017).

2. Objetivos

Las hipótesis que se plantean en esta tesis son:

1. Los valores de variabilidad de frecuencia cardíaca calculados con la RMSSD resultantes de registros ultracortos de 1 minuto de duración son diferentes en función del tiempo de estabilización previa que se utilice, y además, sus respectivos niveles de concordancia con la RMSSD obtenida con el método de referencia, 5 minutos de registro con 5 minutos de estabilización previa, también son diferentes, con lo cual se pondrá de manifiesto que registros ultracortos de 1 minuto de duración son válidos para el análisis de la RMSSD, pero siempre que haya un tiempo de estabilización previa suficientemente prolongado.
2. La percepción de esfuerzo como estímulo de entrenamiento, la variabilidad de la frecuencia cardíaca y el estado de bienestar entre los diferentes días del microciclo de entrenamiento del período competitivo son diferentes, lo cual refleja que, tanto los indicadores de estímulo de entrenamiento (como la carga de entrenamiento), como los indicadores de respuesta del jugador a este estímulo (RMSSD y estado de bienestar) no son iguales todos los días del microciclo de entrenamiento entre un partido y otro, sino que cambian en función de su cercanía o lejanía al partido.
3. La percepción subjetiva de esfuerzo del día anterior se relaciona con los indicadores de respuesta ante este estímulo registrados al día siguiente, como la HRV, las percepciones de fatiga y de estado muscular, así como también estos estarán relacionados entre ellos y con la percepción de la calidad del sueño de la noche entre el día de entrenamiento y el día posterior.

En base a estas hipótesis previas, se han planteado los siguientes objetivos:

1. Comprobar la validez de registros ultra-cortos de HRV de 1 minuto de duración en futbolistas profesionales con diferentes tiempos de estabilización previa.

- 1.1 Comparar entre sí los valores de RMSSD resultantes de registros ultracortos de 1 minuto de duración con diferentes tiempos de estabilización.
- 1.2 Determinar el nivel de concordancia entre los valores de RMSSD resultantes de registros ultracortos con diferentes tiempos de estabilización, y el valor del registro criterio de 5 minutos tras 5 minutos de estabilización.

2. Identificar las diferencias en los indicadores de carga, de HRV y de estado de bienestar entre tipos de día del microciclo del período competitivo en futbolistas profesionales.

3. Conocer las relaciones entre percepción subjetiva de esfuerzo, HRV e indicadores de percepción subjetiva de fatiga, estado muscular y calidad de sueño.

3. Material y método

3.1 Muestra

En este estudio participaron 6 futbolistas profesionales de clubes pertenecientes a la Liga de Fútbol Profesional del fútbol español durante la temporada 2015-2016 (tabla 5). Los jugadores jugaban en 6 equipos profesionales diferentes durante el período de estudio y tenían una experiencia media en el fútbol profesional de 2 años. La edad (media + desviación típica) de los jugadores era $24 \pm 1,7$ años, $1,76 \text{ cm} \pm 0,02\text{m}$ de altura, $71,3 \text{ kg} \pm 1\text{kg}$ de peso, $9,7 \pm 0,5$ de grasa corporal y un $\text{VO}_{2\text{max}} = 56,5 \pm 2,2 \text{ ml} \cdot \text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$ siendo sus demarcaciones lateral, central, medio centro y extremo. Normalmente, los jugadores entrenaban 5-6 veces, tenían un día de descanso y un partido en cada microciclo semanal.

Tabla 5

Características de la muestra del estudio.

	Edad (años)	Atura (m)	MC (kg)	% gr corp	$\text{VO}_{2\text{max}}$	Años prof
Sujeto 1	22	1,77	72	9,3	56	2
Sujeto 2	26	1,75	71	10,3	60	3
Sujeto 3	25	1,76	71	9,2	55	1
Sujeto 4	22	1,73	70	10,4	54	2
Sujeto 5	24	1,76	71	9,8	56	3
Sujeto 6	25	1,78	73	9,4	58	1
Media	24	1,76	71,3	9,7	56,5	2
SD	1,7	0,02	1	0,5	2,2	0,8

Nota: SD: desviación estándar; MC: masa corporal; % gr corp: % de grasa corporal; Años prof: años como profesional; $\text{VO}_{2\text{max}}$: Consumo máximo de oxígeno.

En el momento del inicio del estudio los jugadores no tenían ningún tipo de lesión ni enfermedad y habían superado los respectivos reconocimientos médicos y test condicionales que se llevaron a cabo en sus respectivos equipos al inicio de temporada (pruebas de esfuerzo, test de fuerza, test funcionales, test de amplitud de movimiento en cada articulación etc.).

Criterios de exclusión, cuando el jugador estaba lesionado o enfermo sus registros fueron excluidos del estudio. Durante el estudio se registraron un total de 718 registros cortos de intervalos RR de 10 minutos de duración, con una media de 119 registros por jugador.

En la tabla 6 se presentan la muestra de las variables de RMSSD, RPE, y los 3 parámetros de la escala de percepción subjetiva de bienestar (calidad del sueño, estado de fatiga y estado muscular) que se registraron en cada tipo de día del microciclo (los diferentes tipos de días se explican en el apartado de procedimiento). En la nota de la tabla también aparecen el numero de cada variable clasificado por jugador.

Tabla 6

Número de las distintas variables analizadas según el tipo de día del microciclo.

	RMSSD	RPE	Sueño	Fatiga	Estado muscular
Post 1 día descanso	124	0	53	53	53
Post 2 días descanso	19	0	6	6	6
Post 1 día entto	131	48	74	74	74
Post 2 días entto	93	50	62	62	62
Post 3 días entto	27	13	17	17	17
Post 4 días entto	9	5	4	4	4
Post 5 días entto	1	1	1	1	1
Pre partido	108	48	62	62	62
Partido	75	19	30	30	30
Post partido > 45 min	74	12	35	35	35
Post partido < 45 min	23	1	7	7	7
Post entto regenerativo	31	15	12	12	12
TOTAL	718	212	363	363	363

Nota: RMSSD: raíz cuadrada del valor medio de la suma de las diferencias al cuadrado de todos los intervalos RR sucesivos; RPE: escala de percepción subjetiva de esfuerzo; Sueño: percepción subjetiva sobre la calidad del sueño; Fatiga: percepción subjetiva sobre el estado de fatiga; estado muscular: percepción subjetiva sobre el estado muscular; Jugador 1: N de RMSSD 119, N de RPE 36, N de sueño, estado muscular y fatiga 61; Jugador 2: N de RMSSD 119 , N de RPE 45, N de sueño, estado muscular y fatiga 80; Jugador 3: N de RMSSD 119 , N de RPE 39, N de sueño, estado muscular y fatiga 67; Jugador 4: N de RMSSD 119 , N de RPE 25, N de sueño, estado muscular y fatiga 50; Jugador 5: N de RMSSD 119 , N de RPE 29, N de sueño, estado muscular y fatiga 44; Jugador 6: N de RMSSD 119 , N de RPE 38,

N de sueño, estado muscular y fatiga 61; Post entto regenerativo: post entrenamiento regenerativo; Post 1 día entto: post 1 día de entrenamiento; Post 2 días entto: post 2 días de entrenamiento; Post 3 días entto: post 3 días de entrenamiento; Post 4 día entto: post 4 días de entrenamiento; Post 5 días entto: post 2 días de entrenamiento.

El estudio se realizó respetando los principios éticos establecidas por la Declaración de Helsinki (World Medical Association, 2013). Antes del comienzo de la investigación se obtuvo un consentimiento informado escrito por parte de cada participante en el estudio. En el documento se explicaban los objetivos del estudio, que tenían que hacer ellos durante los 9 meses que duraba el estudio y finalmente aspectos relacionados con la ley de protección de datos (anexo).

3.2 Diseño de la investigación

El estudio consistió en un estudio observacional descriptivo longitudinal durante el período competitivo de una temporada de fútbol. Durante el estudio se registró la variabilidad de la frecuencia cardíaca y la percepción de bienestar como indicadores objetivo y subjetivo respectivamente, del grado de asimilación individual de las distintas cargas de entrenamiento (indicadores del estado de fatiga-recuperación), además de la percepción subjetiva de esfuerzo de las sesiones de entrenamiento o partido (carga interna) durante un período competitivo de 9 meses. El estudio se realizó teniendo en cuenta los diferentes tipos de día de un microciclo semanal.

3.3 Variables

Las variables de esta tesis se pueden dividir en variables independientes, tipo de día y variables dependientes, HRV, carga de entrenamiento subjetiva y escala de percepción subjetiva de bienestar. Cabe resaltar que, entre las variables dependientes, la HRV no está influenciada por la subjetividad del futbolista, y la escala de percepción subjetiva de bienestar y RPE si tienen un componente subjetivo.

3.3.1 Tipo de día

Dentro de las variables independientes se encuentra el tipo de día. El microciclo semanal de los jugadores tenía diferentes tipos de día según si jugaba el partido, cuando era su siguiente partido y finalmente, según la distribución semanal de entrenamientos diseñada por los cuerpos técnicos de sus respectivos equipos. En la literatura científica se utiliza una nomenclatura numérica según que posición tiene el día en concreto en relación al partido (Thorpe y cols., 2015), siendo 0 el día de partido, +1 el día post partido, -4 es el cuarto día de entrenamiento antes del siguiente partido, - 3 es el tercer entrenamiento antes del siguiente partido y así sucesivamente hasta llegar otra vez a 0 que es el siguiente partido. En esta tesis se ha utilizado una nomenclatura que permite entender el tipo de día de entrenamiento realizado los días previos al registro, y así poder relacionarlo con el valor de RMSSD y con la escala de percepción subjetiva de bienestar. A continuación, se describen los diferentes tipos de días que se han utilizado (figura 12).

- Post-1 día descanso: día posterior a un día en que el jugador no tenía ningún tipo de entrenamiento y que estaba destinado a continuar con la recuperación tras haber competido realizado un entrenamiento compensatorio. Normalmente los jugadores tenían 1 día de descanso a la semana.
- Post-2 días descanso: día posterior a disfrutar de 2 días sin entrenamientos de ningún tipo.
- Post-1 día/ Post-2 días/ Post-3 días/ Post-4 días /Post-5 días de entrenamiento: día posterior a cuando el jugador realizaba 1,2,3,4,5 sesiones de entrenamiento destinadas a preparar el siguiente partido. El jugador que no jugaba más de 45 minutos en el partido del día anterior, realiza un entrenamiento intenso al día siguiente, llamado normalmente entrenamiento compensatorio, con el objetivo de recibir una carga alta de entrenamiento que pueda compensar el hecho de no jugar. Este tipo de día se ha considerado como un entrenamiento habitual, por ello, el día de después de este tipo de entrenamiento se ha llamado post 1 día de entrenamiento.
- Pre-partido: entrenamiento del día previo a la competición caracterizado por su corta duración y su baja carga.
- Partido: día en que el jugador tenía competición.

- Post-partido > 45 min: día posterior a cuando el jugador jugaba más de 45 minutos en el partido del día anterior.
- Post-partido <45 min: día posterior a cuando el jugador jugaba menos de 45 minutos en el partido del día anterior.
- Post-entrenamiento regenerativo: día posterior a cuando el jugador realizaba un entrenamiento de recuperación o regenerativo después de haber jugado más de 45' en el partido con el objetivo de acelerar la recuperación del jugador.

POST 1 DÍA DESCANSO	POST 2 DÍAS DESCANSO	POST 1 DÍA ENTRENAMIENTO	POST 2 DÍAS ENTRENAMIENTO	POST 3 DÍAS ENTRENAMIENTO	POST 4 DÍA ENTRENAMIENTO	POST 5 DÍAS ENTRENAMIENTO	ENTRENAMIENTO PREPARTIDO	PARTIDO	POST PARTIDO > 45 MIN	POST PARTIDO < 45 MIN	POST ENTTO REGENERATIVO
---------------------	----------------------	--------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	---------------------------	--------------------------	---------	-----------------------	-----------------------	-------------------------

Figura 12. Tipos de día de un microciclo competitivo.

3.3.2 HRV

Como hemos visto en el marco teórico, existen multitud de parámetros de HRV. Y dependiendo del método que se utilice para analizar el archivo RR (método de tiempo, dominio de frecuencias y lineal) habrá unos u otros parámetros. En el caso concreto de esta tesis, se ha decidido usar el método de dominio de tiempo para analizar los archivos RR por varias razones. Por un lado, estos parámetros están menos influenciados por la respiración que los otros dos métodos. Por otro lado, son fácil de calcular y finalmente tienen un coeficiente de variación menor que los parámetros obtenidos con el método de frecuencias o lineal (Plews y cols., 2013; Penttilä, y cols., 2001).

Los registros de la frecuencia cardíaca tuvieron una duración de 10 minutos, a partir de los cuales se obtuvieron diferentes valores de RMSSD a partir de los siguientes intervalos de tiempo (figura 13):

RMSSD referencia-criterio (RMSSD₅₊₅): el valor de RMSSD se obtuvo de los últimos 5 minutos del registro total de 10 minutos, considerando los primeros 5 minutos como período de estabilización (5+5).

RMSSD de intervalos ultra-cortos de 1 minuto de duración con diferentes tiempos previos de estabilización (figura 13).

a) **RMSSD del primer minuto ($RMSSD_{0+1}$)**: el valor de RMSSD se obtuvo del primer minuto del registro total de 10 minutos, sin considerar ningún tiempo de estabilización previo (0+1).

b) **RMSSD del segundo minuto ($RMSSD_{1+1}$)**: el valor de RMSSD se obtuvo del segundo minuto del registro total de 10 minutos, con 1 minuto previo como período de estabilización (1+1).

c) **RMSSD del tercer minuto ($RMSSD_{2+1}$)**: el valor de RMSSD se obtuvo del tercer minuto del registro total de 10 minutos, con 2 minutos previo como período de estabilización (2+1).

d) **RMSSD del cuarto minuto ($RMSSD_{3+1}$)**: el valor de RMSSD se obtuvo del cuarto minuto del registro total de 10 minutos, con 3 minutos previo como período de estabilización (3+1).

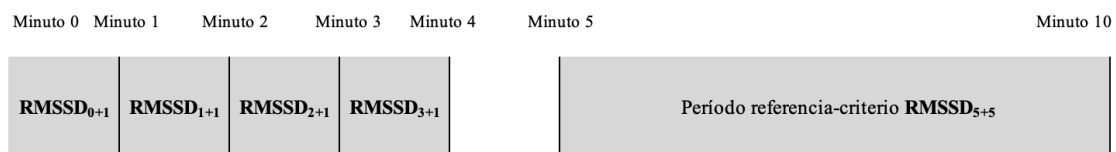


Figura 13. Valores de RMSSD a partir de diferentes intervalos de tiempo.

Posteriormente estos intervalos de 1 minuto se compararon entre ellos y con el valor de RMSSD del período referencia-criterio.

3.3.3 Carga de entrenamiento subjetiva

Para conocer la carga interna de entrenamiento subjetiva se utilizó la escala de percepción subjetiva de esfuerzo (RPE) de Foster y cols., 2001. En la escala propuesta y validada por Borg (1985) y modificada más tarde por Foster y cols. (2001) (figura 14) se valora la intensidad que ha tenido la sesión de entrenamiento de 1 a 10. Algunos autores como Haddad Stylianides, Djaoui, Dellal y Chamari (2017) han observado como el RPE parece una solución interesante y se ha propuesto como un método simple, no invasivo y económico para monitorizar la carga de entrenamiento. Además, estos autores definen la

RPE como la mejor herramienta calidad/precio para prevenir el sobre-entrenamiento en una fase temprana.

¿Cómo ha sido de dura la sesión?
1. Muy, muy suave
2. Suave
3. Moderada
4. Algo dura
5. Dura
6.
7. Muy dura
8.
9.
10. Máxima

Figura 14: Escala de percepción subjetiva de esfuerzo (RPE). Modificada de Foster y cols. (2001).

3.3.4 Escala de percepción subjetiva de bienestar

Para conocer y calcular las variables de bienestar y fatiga se utilizó el cuestionario propuesto por Hooper y cols. (1995) (figura 15). Este cuestionario consistía en 3 preguntas sobre la calidad del sueño, nivel de fatiga y percepción muscular. La escala de estas tres variables oscilaba entre 1 y 7, refiriéndose 1 a la peor percepción negativa y 7 a la mejor percepción positiva. Algunos autores como Al Haddad y cols. (2014), y Thorpe y cols. (2015, 2016) en futbolistas profesionales, observaron que las escalas de percepción subjetiva de bienestar son un método simple, económico, fácil de administrar y fiable para monitorizar el nivel de fatiga.

Calidad del sueño	Fatiga	Daño muscular
1-Muy, muy bueno	1-Muy, muy alta	1- Muy, muy bajo
2-Muy bueno	2-Muy alta	2- Muy bajo
3-Bueno	3-Baja	3- Bajo
4-Medio	4-Media	4- Medio
5-Malo	5-Alta	5- Alto
6-Muy malo	6-Muy alta	6- Muy alto
7-Muy, muy malo	7-Muy, muy alta	7- Muy, muy alto

Figura 15. Escala de percepción subjetiva de bienestar. Modificada de Al Haddad y cols. (2014)

3.4 Procedimiento

Los datos del estudio se recogieron durante 9 meses del período competitivo (agosto-abril) de la temporada 2015-2016. Previamente al inicio del período de estudio los jugadores se familiarizaron con el protocolo de registro durante 2 semanas. Los registros se realizaron tanto en los días que el jugador tenía entrenamiento o competición como también en los días de descanso que no tenían entrenamiento.

3.4.1 Registro de datos

Después de cada entrenamiento o partido, el grado de esfuerzo que había supuesto este, se registró a través del cuestionario de percepción subjetiva de esfuerzo (RPE) en sus *smartphones* (aproximadamente 30 minutos tras acabar el entrenamiento-partido) mediante la aplicación Coachmeplus® El cuestionario RPE que se utilizó fue el de Foster y cols. (2001).

Al día siguiente, por la mañana nada más despertarse se registró la HRV y la escala de percepción subjetiva de bienestar (figura 16).



Figura 16. Protocolo diario de toma de datos. Elaboración propia

Registro de HRV: los jugadores realizaron los registros cortos de HRV justo después de despertarse en posición supina en sus respectivas casas entre las 8:00 y las 10:00 horas de la mañana (menos los días de partido que se la tomaban en el hotel de concentración). Los jugadores realizaban el registro con una banda de registro del Polar Team-2[®] siguiendo las recomendaciones del fabricante (Polar Electro, Kempele, Finland). La banda Polar ha sido usada y validada previamente para realizar registros y estudiar la HRV (Nunan y cols., 2009; Buchheit y cols., 2013). Los jugadores humedecían la banda con gel transmisor de ECG antes de colocársela alrededor del pecho. Estos dejaban la banda en la mesita de noche antes de acostarse para que el protocolo de registro fuera lo más parecido todos los días y así evitar alteraciones que pudieran afectar a la validez de los registros. Una vez realizados los registros los archivos se transferían a la base central del Polar Team 2. Posteriormente estos archivos se convertían a archivos txt y se analizaban con un programa especializado en HRV llamado Kubios[®]. El análisis de la HRV que permitía Kubios se ha basado únicamente en la variable del método de tiempo RMSSD ya que RMSSD se ha demostrado que refleja de una manera sencilla y fiable la actividad vagal (Al Haddad y cols., 2011). Todos los archivos analizados se filtraron de manera automática para corregir los posibles artefactos. Esta corrección se realizó antes del análisis del archivo con la opción de filtrado medio del propio programa Kubios[®].

Los registros tenían una duración de 10 minutos siguiendo las recomendaciones de Task force (1996). El protocolo de registro empezaba justo después que se despertasen los jugadores. Una vez despiertos, los jugadores iban al baño a vaciar la vejiga con el fin de evitar el hecho que el tener la vejiga llena pudiera afectar al plexo solar, y alterar así el resultado de los registros. Después volvían a la cama para realizar el registro durante 10 minutos. Durante los registros, los jugadores permanecían tumbados en la cama tranquilos, sin moverse ni hablar y respirando de una manera espontánea. Los jugadores

no habían consumido cafeína y alcohol durante al menos las 24 horas previas al registro. Cada jugador realizó aproximadamente 3 registros semanales de variabilidad de frecuencia cardíaca siguiendo las recomendaciones hechas por Plews y cols. (2013) para el análisis de la HRV en el deporte profesional.

También por la mañana, los jugadores rellenaban el cuestionario de percepción subjetiva de bienestar con sus *smartphones* mediante la aplicación Coachmeplus®. Este cuestionario consistía en 3 preguntas sobre la calidad del sueño, nivel de fatiga y percepción muscular. La escala de estas tres variables oscilaba entre 1 y 7, refiriéndose 1 a la peor percepción negativa y 7 a la mejor percepción positiva, tal como propone Hooper (Hooper y cols., 1995).

3.5 Análisis estadístico

La normalidad de las distribuciones de RMSSD, RPE, y los 3 parámetros de la escala de percepción subjetiva de bienestar (sueño, fatiga y estado muscular) se comprobó con la prueba de Kolmogorov-Smirnov, que determinó que ninguna de las distribuciones se ajustaba a la normalidad ($p < 0.05$).

Para conocer el tiempo mínimo de estabilización necesario en las mediciones ultra-cortas de HRV se comparó el valor de RMSSD de cada intervalo de tiempo de 1 minuto (RMSSD₀₊₁, RMSSD₁₊₁, RMSSD₂₊₁, RMSSD₃₊₁ y RMSSD₅₊₅) mediante el test de Friedman. Posteriormente, para comprobar las diferencias entre pares se utilizó la prueba post-hoc de Wilcoxon aplicando la corrección de Bonferroni. Se utilizó el criterio de Cohen (1988) para determinar el tamaño del efecto de las diferencias considerándose trivial (<0.2), pequeño (0.2-0.6), moderada (0.6-1.2), grande (1.2-2.0) o muy grande (>2.0). Para conocer el grado de acuerdo de RMSSD de cada intervalo de tiempo (RMSSD₀₊₁, RMSSD₁₊₁, RMSSD₂₊₁, RMSSD₃₊₁) con el valor de RMSSD del período referencia-criterio (RMSSD₅₊₅) se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman (r_s). La magnitud de la correlación se determinó como insignificante: $r < 0,1$; baja: 0,1-0,3; moderada: 0,3-0,5; alta: 0,5-0,7; muy alta: 0,7-0,9; extremadamente alta: $>0,9$; y perfecta: 1 (Hopkins, 2000).

Al tener RMSSD una distribución no normal se aplicaron pruebas estadísticas no paramétricas utilizando la mediana (Mdn), como estadístico de tendencia central, junto al rango intercuartil (IQR) (diferencia entre el cuartil 1 y el 3), como estadístico de dispersión.

También se realizó la prueba de Bland-Altman con el objetivo de identificar los límites superiores e inferiores del intervalo de confianza entre los valores del período referencia-criterio y los valores de los intervalos ultra-cortos de 1 minuto. Para ello, se normalizó el valor de RMSSD transformándolo al LnRMSSD (Bland y Altman, 1986).

Para comparar el valor de RPE y de los parámetros de bienestar (sueño, fatiga y estado muscular) entre cada tipo de día del microciclo se usó en un primer paso el test de Friedman. Posteriormente, para comprobar las diferencias entre pares se utilizó la prueba post-hoc de Wilcoxon aplicando la corrección de Bonferroni. Se utilizó el criterio de Cohen (1988) para determinar el tamaño del efecto de las diferencias considerándose trivial (<0.2), pequeño ($0.2-0.6$), moderada ($0.6-1.2$), grande ($1.2-2.0$) o muy grande (>2.0). El mismo procedimiento se utilizó para comparar el valor de RMSSD entre cada tipo de día.

Para conocer el grado de acuerdo del valor de RMSSD con el valor de RPE, sueño, fatiga y estado muscular de cada tipo de día se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman (r_s). La magnitud de la correlación se determinó como insignificante: $r < 0,1$; baja: $0,1-0,3$; moderada: $0,3-0,5$; alta: $0,5-0,7$; muy alta: $0,7-0,9$; extremadamente alta: $>0,9$; y perfecta: 1 (Hopkins, 2000).

Al no cumplir la RPE y las variables de percepción subjetiva de bienestar (sueño, fatiga, y estado muscular) los criterios de normalidad se aplicaron pruebas estadísticas no paramétricas utilizando la mediana (Mdn), como estadístico de tendencia central, junto al rango intercuartil (IQR) (diferencia entre el cuartil 1 y el 3), como estadístico de dispersión.

Los análisis estadísticos y estudio de los datos se llevaron a cabo con el programa IBM SPSS software (versión 21.0, New York, USA) y el programa Excel® (versión 16.15).

4. Resultados

Los resultados se muestran organizados por los distintos objetivos de la presente tesis doctoral.

4.1. Tiempo mínimo de estabilización necesario en las mediciones ultra-cortas de HRV en futbolistas profesionales

Tres cuestiones emergen como puntos importantes para conocer el tiempo de estabilización necesario para realizar mediciones de HRV ultracortas de un minuto. La primera es saber si los resultados de los registros ultracortos de un minuto son similares a pesar de utilizar diferentes tiempos de estabilización (0, 1, 2 y 3 min). La segunda es saber si los resultados a partir de registros ultracortos de un minuto con diferentes tiempos de estabilización son similares al resultado del registro criterio de 5 minutos con 5 minutos previos de estabilización. La tercera, que está íntimamente relacionada con la segunda y que la complementa, es conocer el nivel de concordancia que existe entre el resultado de cada uno de los registros ultracortos de un minuto con diferentes tiempos de estabilización, con el resultado del registro criterio de 5 minutos con 5 minutos de estabilización.

Al comparar entre sí los valores de RMSSD de los 4 intervalos de 1 minuto de duración (diferentes tiempos de estabilización), las pruebas estadísticas realizadas mostraron que existían diferencias en RMSSD entre los diferentes intervalos de 1 minuto ($p < .001$). El test *post-hoc* muestra como el valor de RMSSD obtenido sin ningún tiempo de estabilización previo al registro (RMSSD₀₊₁) fue diferente a los valores obtenidos con uno o más minutos de estabilización previa (RMSSD₁₊₁, RMSSD₂₊₁, RMSSD₃₊₁). RMSSD₀₊₁ (Mdn = 95.1) fue significativamente más alto que RMSSD₁₊₁ (Mdn = 87.1), $z = -9.58$ $p < .001$, $r = -.36$, más alto que RMSSD₂₊₁ (Mdn = 83.2), $z = -11.42$ $p < .001$, $r = -.43$, y más alto que RMSSD₃₊₁ (Mdn = 82.3), $z = -11.57$ $p < .001$, $r = -.44$. Por otro lado, los valores de RMSSD de los intervalos de 1 minuto de duración con 1 o más minutos previos de estabilización no mostraban diferencias significativas entre ellos (RMSSD₂₊₁ (Mdn = 83.2) y RMSSD₃₊₁ (Mdn = 82.3)) o solo diferencias triviales. RMSSD₁₊₁ (Mdn = 87.1) era ligeramente más alto que RMSSD₂₊₁ (Mdn = 83.2), $z = -3.54$ $p < .001$, $r = -.13$, y RMSSD₃₊₁ (Mdn = 82.3), $z = -4.27$ $p < .001$, $r = -.16$.

Al comparar los registros ultra-cortos con el período referencia-criterio de 5 minutos, se observó que el valor obtenido durante un minuto sin ningún tiempo previo de estabilización (RMSSD₀₊₁) fue diferente al valor del período referencia-criterio RMSSD₅₊₅ (Mdn = 87.7), $z = -11.0$ $p < .001$, mostrando un tamaño del efecto pequeño ($r = -.41$), mientras que el resto de intervalos de 1 minuto de duración (que tuvieron 1 o más minutos de estabilización previa) no mostraban diferencias significativas con el valor del periodo referencia-criterio RMSSD₁₊₁ (Mdn = 87.1)) o en caso de que p fuera menor de 0.05 los tamaños del efecto fueron triviales RMSSD₂₊₁ (Mdn = 83.2), $z = -4.74$ $p < .001$, $r = -.18$, RMSSD₃₊₁ (Mdn= 82.3), $z = -5.28$ $p < .001$, $r = -.19$ (tabla 7).

Tabla 7

Valor de RSMMD de los primeros intervalos de 1 minuto y del período referencia-criterio de 5 minutos.

Intervalos de tiempo	N	Media (ms)	SD (ms)	Median(ms)	P25(ms)	P75(ms)
RMSSD ₀₊₁	718	98.29	30.00	95.1	76.6	117.9
RMSSD ₁₊₁	711	90.42	28.54	87.1	69.5	107.6
RMSSD ₂₊₁	714	87.42	26.65	83.2	68.2	104.2
RMSSD ₃₊₁	714	86.35	27.23	82.3	66.2	102.9
RMSSD ₅₊₅ (período referencia- criterio)	703	89.88	24.67	87.7	70.7	107.1

Nota: RMSSD = Raíz cuadrada de la media de la suma de las diferencias al cuadrado de todos los intervalos RR; SD: desviación estándar; Median: mediana; P25: percentil 25; P75: percentil 75; 0+1: 0 minutos de estabilización previa y 1 minuto de duración del registro; 1+1: 1 minuto de estabilización previo y 1 minuto de duración del registro; 2+1: 2 minutos de estabilización previos y 1 minuto de duración del registro. 3+1: 3 minutos de estabilización previos y 1 minuto de duración del registro; 5+5: 5 -minutos de estabilización previa y 5 minutos de duración del registro.

Al determinar la correlación entre los registros ultra-cortos de 1 minuto y el período referencia-criterio (RMSSD₅₊₅) en futbolistas profesionales, todos los intervalos de 1 minuto de RMSSD se correlacionaron con el valor de los 5 minutos del período de referencia-criterio ($p < .01$), pero cabe destacar que el valor de RMSSD₀₊₁ (sin tiempo

previo de estabilización) mostró un coeficiente de correlación más bajo .78, comparado con los otros intervalos que sí tenían un tiempo de estabilización previo (Tabla 8).

Tabla 8

Correlación entre RMSSD de cada intervalo ultracorto de un minuto y RMSSD del período referencia-criterio de 5 minutos.

Intervalos de tiempo	r_s	p	Intervalo de confianza LnRMSSD Bias ($\pm 1.96SD$)
RMSSD ₀₊₁	.78	< .01	2.55 (1.93)
RMSSD ₁₊₁	.84	< .01	2.05 (2.27)
RMSSD ₂₊₁	.83	< .01	1.88 (2.28)
RMSSD ₃₊₁	.84	< .01	1.83 (2.19)
RMSSD ₅₊₅ (período criterio)	--	--	--

Nota: r_s : Rho Spearman; p: p valor de la correlación con el período. RMSSD: Raíz cuadrada de la media de la suma de las diferencias al cuadrado de todos los intervalos RR; 0+1: 0 minutos de estabilización previa y 1 minuto de duración del registro; 1+1: 1 minuto de estabilización previo y 1 minuto de duración del registro; 2+1: 2 minutos de estabilización previos y 1 minuto de duración del registro. 3+1: 3 minutos de estabilización previos y 1 minuto de duración del registro; 5+5: 5 -minutos de estabilización previa y 5 minutos de duración del registro.

El análisis de Blant-Altman muestra como el primer intervalo de 1 minuto sin ningún tiempo previo de estabilización (LnRMSSD₀₊₁) sobreestima el valor del período referencia-criterio LnRMSSD₅₊₅ (Figura 17).

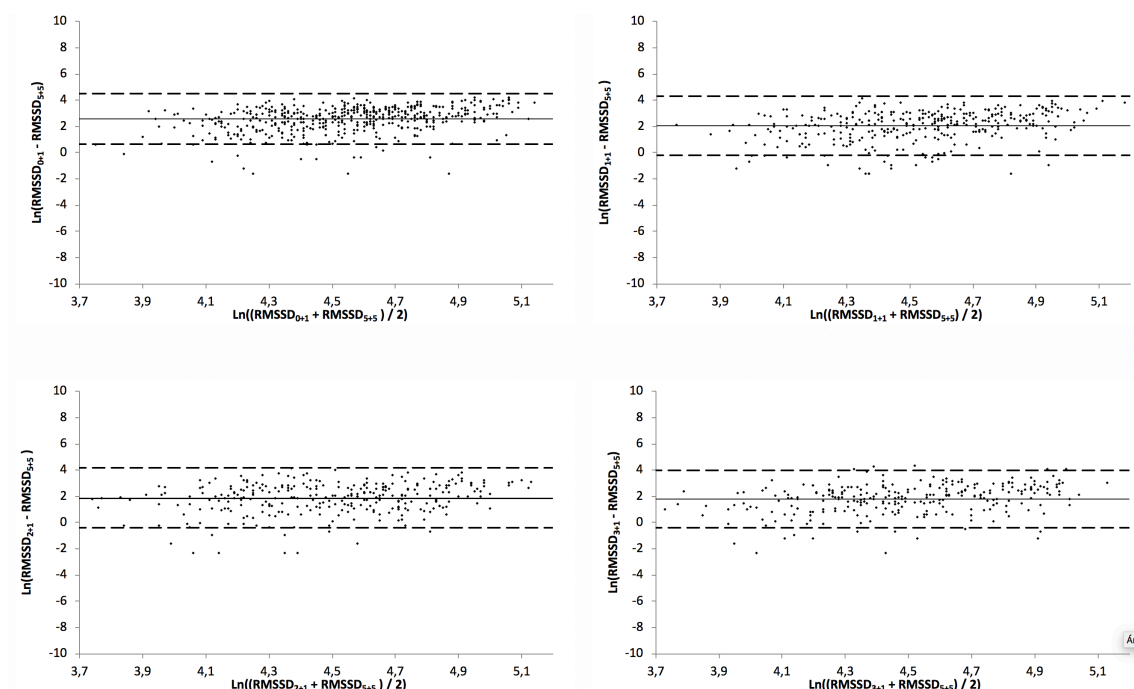


Figura 17. Gráfico de Bland-Altman del LnRMSSD de cada intervalo de 1 minuto con diferentes tiempos previos de estabilización con el LnRMSSD₅₊₅ del periodo referencia-criterio. LnRMSSD: Logaritmo neperiano de la raíz cuadrada de la media de la suma de las diferencias al cuadrado de todos los intervalos RR; 0+1: 0 minutos de estabilización previa y 1 minuto de duración del registro; 1+1: 1 minuto de estabilización previo y 1 minuto de duración del registro; 2+1: 2 minutos de estabilización previos y 1 minuto de duración del registro. 3+1: 3 minutos de estabilización previos y 1 minuto de duración del registro; 5+5: 5 minutos de estabilización previa y 5 minutos de duración del registro.

4.2 RPE y parámetros de bienestar (sueño, fatiga y estado muscular) en los diferentes tipos de día del microciclo

El valor de RMSSD que obtiene un día cada jugador es el resultado del tipo de entrenamiento que ha podido tener el día previo, entre otros factores que pueden influir. En este estudio no se tienen valores de RPE del día partido, aunque se sabe que el día de mayor carga corresponde al día de partido. La razón de no tener datos reside en que los futbolistas profesionales al acabar el partido no rellenaban el cuestionario de RPE debido a una gran variedad de circunstancias.

En cuanto al valor de RPE de cada tipo de día, se comprobó primero que la distribución de la variable presentaba una distribución distinta a la normal. A continuación, se realizó la prueba de Friedman para muestras relacionadas y detectar

diferencias entre los diferentes tipos de día del microciclo (post 1 día de entrenamiento, post 2 días de entrenamiento, pre-partido y post entrenamiento regenerativo). Esta comparación del nivel de esfuerzo percibido entre los distintos tipos de día mostró diferencias significativas ($p < 0,05$). Para comprobar entre qué pares se encontraban las diferencias se utilizó la prueba *post-hoc* de Wilcoxon aplicando la corrección de Bonferroni. Se encontraron las siguientes diferencias en los valores de RPE entre pares de los siguientes días (figura 18):

El valor de percepción subjetiva de esfuerzo del día pre- partido fue más bajo Mdn [IQR]=2,94[2,25-3,44] que:

- Post-1 día de entrenamiento (Mdn [IQR]=5,38[4,55-6,58] ($r=1,02$), con un tamaño de efecto moderado.
- Post-2 días de entrenamiento (Mdn [IQR]=5,33[4,45-6,32] ($r=1,02$), con un tamaño de efecto moderado.

Por otro lado, el valor de percepción subjetiva de esfuerzo del día pre partido fue más alto (Mdn [IQR]=2,94[2,25-3,44] que:

- Post entrenamiento regenerativo (Mdn [IQR]=1,58[1,10-2,14].

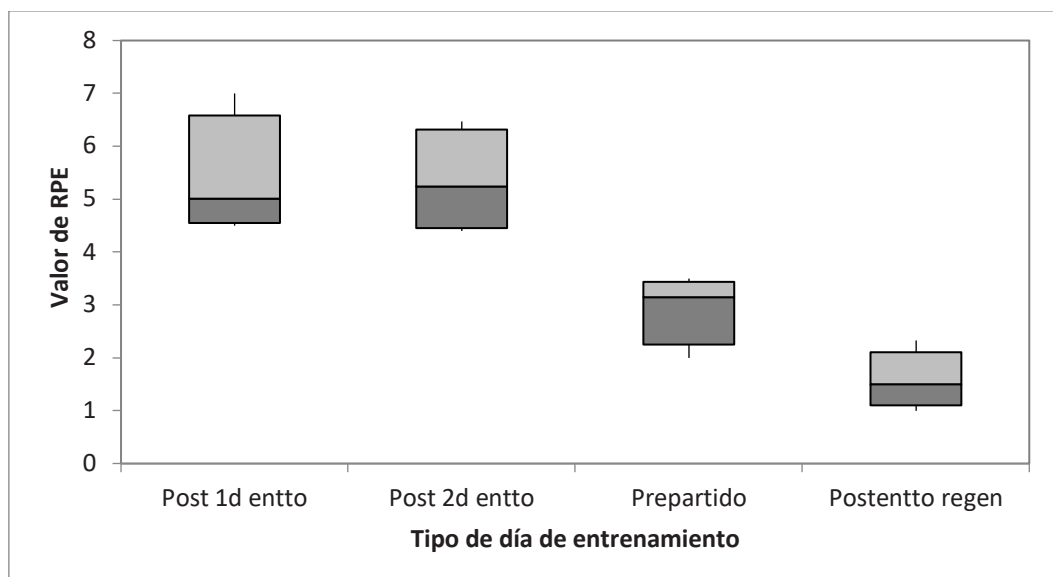


Figura 18. Diferencias en la percepción subjetiva de esfuerzo (RPE) según el tipo de día. Post 1d entto: post 1 día de entrenamiento; Post 2d entto: post 2 días de entrenamiento; Postentto regen: post entrenamiento regenerativo *Diferencias significativas ($p<.05$) con Post 1d entto y post 2d entto.

Los días post-1, 2, días de descanso, post-3,4,5 días de entrenamiento, partido, post partido<45 minutos y post partido>45 minutos no se han utilizado para los diferentes cálculos estadísticos debido al bajo número de registros del valor de RPE o debido también a que algunos jugadores no presentaban ningún valor de estado percepción subjetiva de esfuerzo en los días mencionados.

En cuanto al valor de la percepción subjetiva de fatiga se comprobó primero que la distribución de la variable presentaba una distribución no normal. A continuación, se realizó la prueba de Friedman para muestras relacionadas con los siguientes tipos de días del microciclo: post1 día de descanso, post-1,2, y 3 días de entrenamiento, pre-partido, partido y post-partido>45 minutos. Se realizó una comparación del nivel de fatiga entre los distintos tipos de día y se encontraron diferencias significativas ($p<0,05$). Tras comprobar las diferencias entre pares se utilizó la prueba *post-hoc* de Wilcoxon aplicando la corrección de Bonferroni. Se encontraron diferencias significativas entre pares en los niveles de fatiga entre algunos pares de días ($p<0,05$) (figura 19):

El valor de percepción subjetiva de fatiga fue más bajo el día post partido > 45 minutos (Mdn [IQR]=4,16[3,69-4,85] que:

- Post-1 día de descanso (Mdn [IQR]=5,06[4,65-5,49] ($r=0,91$), con un tamaño de efecto moderado.
- Post-3 días de entrenamiento (Mdn [IQR]=4,83[4,16-5,50] ($r=0,91$), con un tamaño de efecto moderado.
- Pre-partido (Mdn [IQR]=5,01[4,68-5,41] ($r=0,91$), con un tamaño de efecto moderado.
- Partido ((Mdn [IQR]=5,09 [4,91-5,31] ($r=0,91$), con un tamaño de efecto moderado.

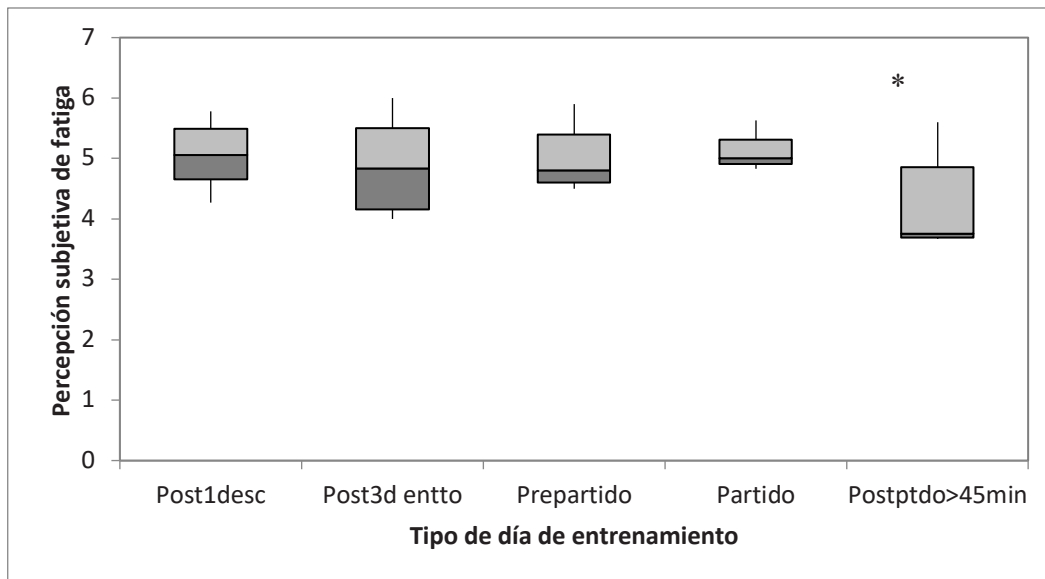


Figura 19. Diferencias en la percepción subjetiva del nivel de fatiga según el tipo de día. Post 1d des: post 1 día de descanso; post 3d ento: post 3 días de entrenamiento; postptdo>45min: post partido>45 minutos. *Diferencias significativas ($p < .05$) con todos los demás días.

Como se observa en la figura 19, el día post-partido>45 minutos presenta el valor más bajo de fatiga, mientras el valor del día post-1 día de descanso fue el día en que los jugadores mostraron los valores más altos de percepción de fatiga. Cabe recordar que en el cuestionario de percepción subjetiva de bienestar los valores más cercanos a 0 se relacionan con un mayor nivel de percepción de fatiga mientras que valores más cercanos a 7 se relacionan con una menor fatiga.

Los días post-2, post-4 y post-5 días de entrenamiento, post-partido< 45 minutos y post entrenamiento regenerativo no se han utilizado para los diferentes cálculos estadísticos de percepción de fatiga debido al bajo número de registros de percepción subjetiva de fatiga en esos tipos de días o debido también a que algunos jugadores no presentaban ningún valor de estado percepción subjetiva de fatiga en los días mencionados.

En cuanto al valor de la percepción subjetiva de calidad de sueño se comprobó primero que la distribución de la variable presentaba una distribución distinta a la normal. A continuación, se realizó la prueba de Friedman para muestras relacionadas con los siguientes tipos de días del microciclo (post-1 día de descanso, post-1,2,3,4 días de entrenamiento, pre-partido, partido, post-partido>45 minutos y post-entrenamiento

regenerativo). Se realizó una comparación de la percepción de la calidad de sueño entre los distintos tipos de día y no se encontraron diferencias significativas. Tras comprobar este hecho, se agruparon los 9 tipos de día analizados anteriormente en 2 grupos; los días que se encontraban antes del partido (post1 día de descanso, post-1,2,3 y 4 días de entrenamiento, pre-partido y partido) y los días que sucedían al partido (post-partido>45 minutos y post-entrenamiento regenerativo). El objetivo de este análisis fue comprobar si existían diferencias significativas entre los días previos y posteriores al partido. Para ello, se realizó la prueba de Wilcoxon y tampoco se encontraron diferencias significativas entre el valor de calidad de sueño de los días previos con el valor de los días posteriores al partido.

Los días post-2 días de entrenamiento, post-5 días de entrenamiento y post-partido< 45 minutos no se han utilizado para los diferentes cálculos estadísticos debido a la baja cantidad de muestra del valor de calidad de sueño en esos tipos de días o debido también a que algunos jugadores no presentaban ningún valor de calidad de sueño en los días mencionados.

En cuanto al valor de la percepción subjetiva de estado muscular se comprobó primero que la distribución de la variable no presentaba una distribución normal. A continuación, se realizó la prueba de Friedman para muestras relacionadas con los siguientes tipos de días del microciclo (post 1 día de descanso, post1,2,3, días de entrenamiento, pre-partido, partido, post-partido>45 minutos). Se realizó una comparación de la percepción del estado muscular entre los distintos tipos de día y se encontraron diferencias significativas ($p<0,05$). Posteriormente se comprobaron las diferencias entre pares (figura 20):

El valor de percepción subjetiva de estado muscular (figura 19) del día post partido > 45 minutos era más bajo (Mdn [IQR]=4,16[3,5-4,70]) que:

- El día de partido (Mdn [IQR]=5[4,69-5,33]) ($r= 0,91$), con un tamaño de efecto moderado.
- El día pre partido (Mdn [IQR]=4,70[4,35-5]).
- El día post 1 día entrenamiento (Mdn [IQR]=4,20[4,35-5,16]).

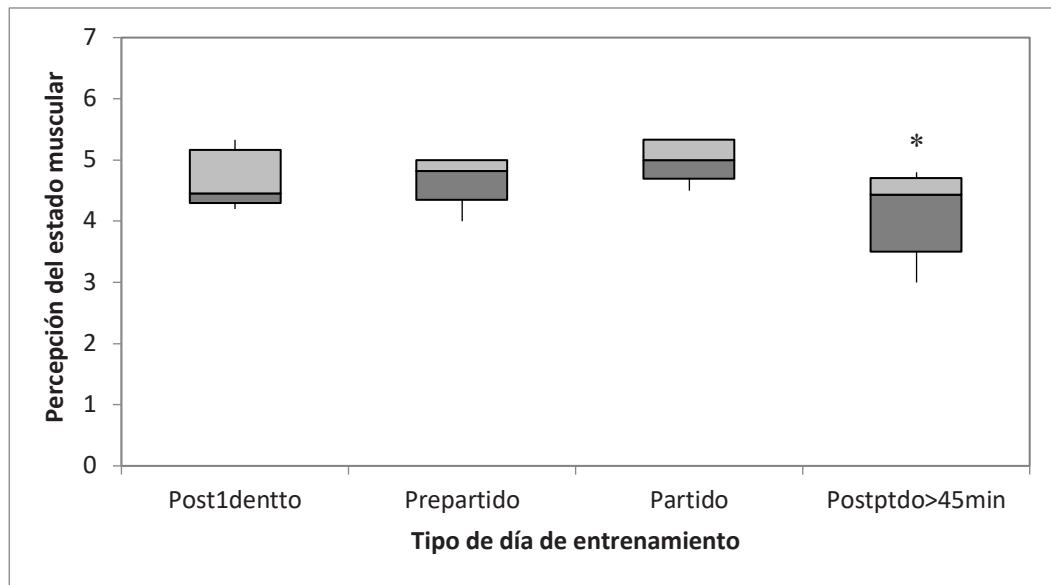


Figura 20. Diferencias en la percepción subjetiva del estado muscular según el tipo de día. Postptdo>45min: post partido >45min; Post1dento: post 1 día de entrenamiento. *: Diferencias significativas ($p<.05$) con el día de partido.

Los días post 2 días de entrenamiento, post 4,5 días de entrenamiento, post partido< 45 minutos y post entrenamiento regenerativo no se utilizaron para los diferentes cálculos estadísticos debido a la baja frecuencia del valor referido al estado muscular en esos tipos de días o debido también a que algunos jugadores no presentaron ningún valor de estado muscular en los días mencionados.

4.3 Valores de RMSSD en cada tipo de día del microciclo

Respecto al valor de RMSSD en cada día del microciclo semanal es necesario resaltar que, una vez comprobado que la distribución de la variable RMSSD no presentaba una distribución normal, se realizó la prueba de Friedman para muestras relacionadas comparando los diferentes días del microciclo (post 1 día de descanso, post-1,2,3 días de entrenamiento, pre-partido, partido, post-partido>45 minutos y post entrenamiento regenerativo). Se realizó una comparación del valor de RMSSD entre los distintos tipos de día y no se encontraron diferencias significativas. Sin embargo, si se encontraron diferencias cuando los días fueron agrupados en dos bloques: por un lado, los días que se encontraban antes del partido (post-1 día de descanso, post-1,2,3, días de entrenamiento, pre-partido y partido) y por otro los días que sucedían al partido (post-partido>45 minutos y post-entrenamiento regenerativo). El objetivo de este análisis fue comprobar si existían

diferencias entre los días previos y posteriores al partido. Para ello, se realizó la prueba de Wilcoxon encontrándose diferencias significativas entre el valor de RMSSD (figura 21).

El valor de RMSSD de los días anteriores al partido fue más alto que (Mdn [IQR]=92,8[74,7-110,6]) que:

- El valor de los días posteriores al partido (Mdn [IQR]=86,1[65,3-104,5]) ($r=0,91$) con un tamaño del efecto moderado (figura 21).

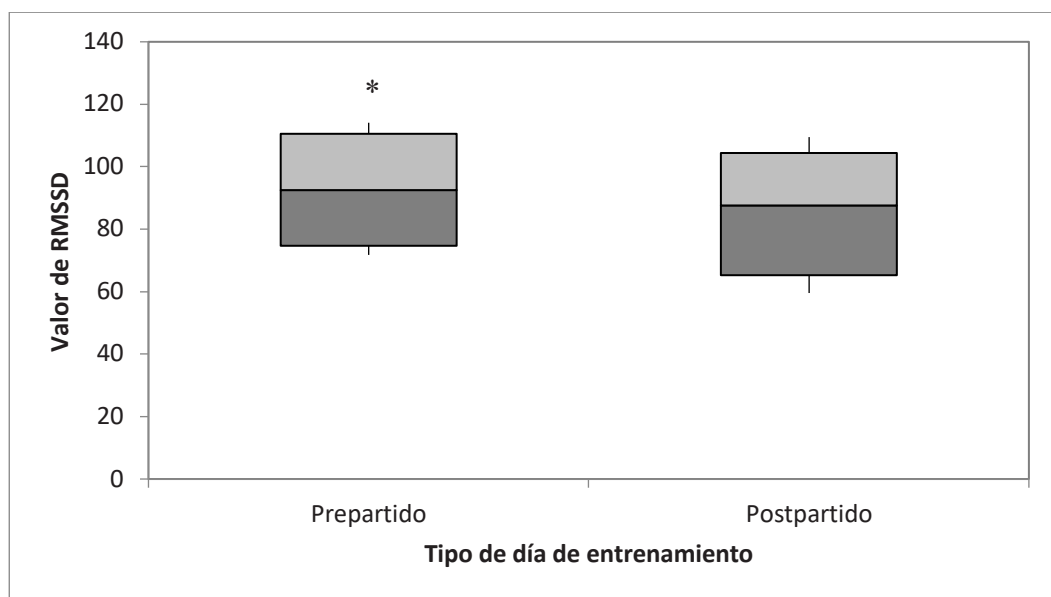


Figura 21. Diferencias en RMSSD según el tipo de día. Prepartido: días previos al partido; Postpartido: días posteriores al partido. *: Diferencias significativas ($p<.05$).

Los tipos de día del microciclo post 2 días de descanso, post 4,5 días de entrenamiento y post partido < 45 minutos no se han utilizado para los diferentes cálculos estadísticos debido a la baja frecuencia del valor de RMSSD en esos tipos de días o debido también a que algunos jugadores no presentaban ningún valor de RMSSD en los días mencionados.

4.4 Relación entre RMSSD, percepción subjetiva de esfuerzo y variables del cuestionario de bienestar (fatiga, sueño y estado muscular)

A continuación, se presentan las distintas correlaciones entre las distintas variables en la tabla 9.

Tabla 9

Coeficientes de correlación de Spearman entre percepción subjetiva de esfuerzo del día anterior, variabilidad de frecuencia cardíaca, calidad del sueño, nivel de fatiga y estado muscular.

	RMSSD	RPE	Sueño	Fatiga	Estado muscular
RMSSD	1.000	-.182**	.084	.180**	-.008
RPE	-.182**	1.000	-.022	-.286**	-.054
Sueño	.084	-.022	1.000	.594**	-.264**
Fatiga	.180**	-.286**	.594**	1.000	.521**
Estado muscular	-.008	-.054	.264**	.521**	1.000

Nota: RMSSD: raíz cuadrada del valor medio de la suma de las diferencias al cuadrado de todos los intervalos RR sucesivos; RPE: escala de percepción subjetiva de esfuerzo; Sueño: percepción subjetiva sobre la calidad del sueño; Fatiga: percepción subjetiva sobre el estado de fatiga; estado muscular: percepción subjetiva sobre el estado muscular; ** Correlación significativa ($p < 0,01$)

En cuanto a las relaciones más representativas se obtuvo una correlación significativa positiva alta entre el estado muscular y el nivel de fatiga ($r_s = 0,521$; $p < 0,01$) y entre nivel de fatiga y calidad de sueño ($r_s = 0,594$; $p < 0,01$). También se obtuvo una correlación significativa positiva baja entre calidad de sueño y estado muscular ($r_s = 0,264$; $p < 0,01$) y entre el nivel de fatiga y RMSSD ($r_s = 0,180$; $p < 0,01$). Por otro lado, se obtuvo una correlación significativa negativa baja entre RPE y RMSSD ($r_s = -0,182$; $p < 0,01$) y entre RPE y el nivel de fatiga ($r_s = -0,286$; $p < 0,01$).

5. Discusión

La discusión ha sido abordada en apartados que se corresponden con los diferentes apartados de los resultados de esta tesis.

5.1 Validez de los registros ultra-cortos de HRV en futbolistas profesionales con diferentes tiempos de estabilización

En relación al primer objetivo de esta tesis, los resultados muestran como los valores de RMSSD registrados en los primeros 4 minutos de registro no son iguales. Es conveniente destacar que el valor de RMSSD registrado durante el primer minuto y con una duración de 1 minuto y sin ningún tiempo previo de estabilización (0+1) es diferente al valor de RMSSD registrado durante 1 minuto y con 1 o más minutos previos de estabilización lo que refuerza la idea que se requiere un tiempo mínimo previo de estabilización para las mediciones de HRV. Prestando atención a los resultados, se puede observar como cuando el tiempo de estabilización es mayor las diferencias obtenidas entre los intervalos sucesivos de 1 minuto de duración son más pequeñas. Los análisis estadísticos muestran diferencias triviales en el valor de RMSSD con 1 minuto previo de estabilización comparado con el valor de RMSSD con 2 y 3 minutos previos de estabilización, y que el valor de RMSSD con 2 y 3 minutos previos de estabilización no presenta diferencias significativas ($RMSSD_{2+1}$, $RMSSD_{3+1}$). Estos resultados muestran la gran importancia que tiene el tiempo previo de estabilización antes de realizar un registro ultra corto de HRV y abre la posibilidad que el tiempo previo de estabilización necesario pueda variar según el tipo de población a la que estemos registrando la HRV. Esto coincide con los datos obtenidos por Krejci y cols. (2018) que han demostrado que el tiempo previo de estabilización necesario es diferente entre deportistas de resistencia y deportistas universitarios, siendo 60'' para los primeros y 90'' para los últimos. Finalmente, cabe destacar que esta tesis es la primera en estudiar el tiempo mínimo previo de estabilización que necesitan los futbolistas profesionales antes de realizar un registro ultra corto de HRV.

Los resultados de esta tesis no se pueden comparar con los obtenidos por Nakamura y cols. (2015) ni con los datos obtenidos por Pereira, Flatt, Ramírez, Loturco y Nakamura (2016) ya que estos analizaron los diferentes intervalos de 1 minuto de

LnRMSSD comparándolos con el período referencia-criterio de 5 minutos, igual que en esta tesis, pero a diferencia de esta, no compararon los diferentes intervalos de 1 minuto entre ellos. Sin embargo, Flatt and Esco (2016b) realizaron 20 registros ultra-cortos de 1 minuto de duración en total, en 10 hombres y 10 mujeres, en posición supina, y compararon, de un modo muy similar al como se ha comparado en esta tesis, cada uno de los intervalos de 1 minuto con los 5 minutos del período referencia-criterio, pero también compararon el valor del LnRMSSD entre los distintos intervalos de 1 minuto. Los autores no encontraron ninguna diferencia entre los distintos intervalos de 1 minuto registrados con diferentes tiempos de estabilización (sin tiempo previo de estabilización hasta varios minutos previos de estabilización). Estos resultados, aparentemente parecen ser diferentes a los nuestros. La razón es que el valor de LnRMSSD del primer intervalo de 1 minuto registrado sin tiempo previo de estabilización no muestra diferencias con el resto de intervalos de 1 minuto. Pero en realidad, los valores del estudio de Flatt y Esco (2016b) son muy similares a los nuestros, ya que ellos usaron antes del registro 1 minuto de preparación en la colocación de los electrodos para poder realizar el posterior ECG. Por lo tanto, los intervalos de 1 minuto que ellos registraron serían en realidad 1+1, 2+1, 3+1, 4+1 (todos con 1 o más minutos de estabilización previa). Los resultados de esta tesis muestran también que no existen diferencias o estas son triviales en el valor de RMSSD cuando se usa 1 o más minutos previos de estabilización.

Comparando los valores de RMSSD de registros ultra-cortos de 1 minuto (con diferentes tiempos previos de estabilización) con el valor de RMSSD del período referencia-criterio se observa claramente que el valor obtenido en el intervalo de 1 minuto realizado sin ningún tiempo previo de estabilización es claramente diferente al valor del período referencia-criterio, mostrando un efecto de tamaño moderado.

Por otro lado, cuando hay uno o más minutos previos de estabilización el valor del registro ultra-corto de 1 minuto se puede comparar al valor del período referencia-criterio. En este sentido, los valores de esta tesis son similares a los de otros estudios. Esco y Flatt (2014) compararon el LnRMSSD de registros ultra-cortos de 1 minuto o menos con los 5 minutos del período referencia-criterio. Los autores usaron 5 minutos de estabilización previa y no encontraron diferencias significativas con el valor del período referencia-criterio. Pereira y cols. (2016) también comprobaron que registros ultra-cortos

de 1 minuto en los primeros 5 minutos de registro ofrecían valores similares a los del período referencia-criterio.

Esta tesis es el primer trabajo que estudia específicamente registros ultra-cortos de RMSSD controlando el tiempo previo de estabilización en futbolistas profesionales, y los resultados de la misma otorgan a esta una importancia destacable ya que se demuestra que los resultados obtenidos de registros ultra-cortos de HRV obtenidos sin tiempo previo de estabilización son diferentes al valor obtenido usando tiempo de estabilización y sobre todo son diferentes a los valores del periodo referencia-criterio.

Atendiendo a las consideraciones realizadas previamente, se puede decir a modo de conclusión de este punto, que esta tesis es la primera en demostrar de forma clara que tiempos de estabilización menores a 1 minuto no son fiables a la hora de valorar la HRV con registros ultra-cortos de RMSSD en futbolistas profesionales. La razón es que los resultados obtenidos sin tiempo previo de estabilización son diferentes a los obtenidos con 1 o más tiempo previo de estabilización.

Respecto a las correlaciones entre los distintos intervalos de 1 minuto de duración con el valor de referencia-criterio, los resultados de esta tesis muestran también que el valor de RMSSD de todos los intervalos de 1 minuto de duración se correlacionan con el valor del período de referencia-criterio, al igual que otros estudios (Pereira y cols., 2016; Esco y Flatt, 2014; Flatt y Esco, 2016b; Bourdillon y cols., 2017). Sin embargo, el valor de RMSSD obtenido del primer minuto de registro, sin tiempo previo de estabilización, presentaba la correlación más baja con el valor del período referencia-criterio. La diferencia entre los valores de RMSSD obtenidos con o sin tiempo previo de estabilización se podría explicar por el retraso con el que se comporta la frecuencia cardíaca cuando el organismo pasa de un estado de actividad a un estado de reposo.

Muñoz y cols. (2015) obtuvieron datos muy interesantes realizando registros ultra-cortos de 10 segundos de duración y que tenían coeficientes de correlación muy similares a los de esta tesis, pero a diferencia de esta, los autores no controlaron el tiempo previo de estabilización. Pereira y cols. (2016) encontraron correlaciones significativas altas en su estudio y comprobaron como registros de LnRMSSD ultra-cortos de 1 minuto (dentro de los primeros 5 minutos de registro) son válidos para registrar HRV en jugadores de

fútbol sala (n=35), demostrando que no es necesario hacer 5 minutos de estabilización previos. Bourdillon et al. (2017) obtuvieron coeficientes de correlación altos entre el valor del período referencia-criterio (valor obtenido de realizar 3 minutos de estabilización previa y un registro ultra-corto de 4 minutos de duración (3+4)) e intervalos de 1, 2 y 3 minutos, pero siempre con 3 minutos previos de estabilización. Finalmente, Esco y Flatt (2014) obtuvieron coeficientes de correlación altos entre el valor del período referencia-criterio (5+5) y registros ultra-cortos de 10 segundos, 30 segundos y 1 minuto de duración, pero siempre con 5 minutos de estabilización previos.

El análisis de Blant-Altman de esta tesis muestra resultados similares al estudio de Pereira y cols. (2016), al igual que los valores que obtienen otros estudios de concordancia (Esco y Flatt, 2014; Flatt y Esco, 2016b).

Una fortaleza de nuestro estudio, en comparación con estudios previos es la diversidad de procedencia de nuestros jugadores, y por tanto, características de los entrenamientos, resultados, y otras variables que pueden influir en los resultados. Los futbolistas que participaron en este estudio jugaban en equipos diferentes, con dinámicas de equipo y formas de entrenamiento diferentes. Por otro lado, nuestro estudio se realizó durante todo el período competitivo, 9 meses, (que es un período de competición largo (Impellizzeri, Rampinini y Marcora, 2005) con diferentes cargas de entrenamiento, diferente densidad competitiva y con diferentes tipos de día de entrenamiento durante todo el período a diferencia muchos estudios sobre la HRV en futbolistas profesionales que lo realizaron durante pretemporada o durante períodos de 2-3 semanas durante el período competitivo (Boullosa y cols., 2013; Thorpe y cols., 2015; Ravé y Fortrat, 2016).

Esta tesis muestra, igual que otros autores (Bourdillon y cols., 2017), que 1 minuto previo de estabilización previo es suficiente para poder registrar RMSSD en reposo, aunque estos autores proponen registros de RMSSD de 2 minutos de duración. Sin embargo, al realizar las pruebas estadísticas de correlación entre los intervalos ultra-cortos de RMSSD y el valor de RMSSD del período referencia-criterio jugador por jugador, se ha observado que no todos los jugadores tenían la correlación más alta en el primer intervalo de 1 minuto con 1 minuto previo de estabilización (1+1) sino también en el intervalo con 2 minutos previos de estabilización. Este hecho plantea la posibilidad que cada jugador pueda necesitar un tiempo mínimo previo de estabilización para poder

realizar registros ultra-cortos de RMSSD. Esta idea coincide con las afirmaciones de otros autores como Krejci y cols. (2018) que han demostrado que sujetos con diferente nivel condicional y que practican diferentes deportes necesitan diferentes tiempos previos de estabilización cuando se realizan registros ultra-cortos de HRV. Es por ello, que aunque los registros ultra-cortos de 1 minuto con 1 minuto previo de estabilización son registros válidos en los futbolistas profesionales que han participado en nuestro estudio, cabe la posibilidad de que en algunos futbolistas profesionales un minuto no fuera suficiente para obtener registros válidos, sino que fueran necesarios tiempos de 2 minutos previos de estabilización al registro ultra-corto de RMSSD de 1 minuto, con el objetivo de asegurar que cuando empiece el registro de HRV, la FC de todos los jugadores se haya estabilizado.

Los resultados obtenidos de esta tesis demuestran la importancia de ser sistemático cuando se usan registros ultra-cortos de 1 minuto de duración. La razón reside en que el uso de diferentes tiempos de estabilización previa puede sesgar el registro de HRV inmediatamente posterior en futbolistas profesionales. Por eso, estandarizar el tiempo previo de estabilización, como mínimo 1 minuto es estrictamente necesario, y bajo nuestro punto de vista, y teniendo en cuenta la variación interpersonal, podría ser recomendable usar 2 minutos como tiempo previo de estabilización.

Los resultados obtenidos también sugieren que registros ultra-cortos de HRV se puedan usar para detectar las oscilaciones diarias en la señal vagal en futbolistas profesionales y por lo tanto la HRV se podría usar para observar la asimilación de las diferentes cargas de entrenamiento de cada jugador basado en el estado de fatiga de cada uno de ellos. De hecho, registros ultra-cortos de HRV se han propuesto en otros deportes y en otro tipo de población para controlar el proceso de entrenamiento (Plews y cols., 2012; Plews y cols., 2017a; Flatt y cols., 2017; Buchheit y cols., 2013; Earnest y cols., 2004).

5.2. Escala de percepción subjetiva de esfuerzo (RPE) según el tipo de día

Antes de discutir los resultados de los siguientes puntos, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, es necesario recordar que la escala de percepción subjetiva de bienestar de esta tesis oscila entre 1 y 7, siendo 1 el valor más negativo y el 7 el valor más positivo de las 3 variables

estudiadas (calidad de sueño, estado de fatiga y estado muscular)., igual que en el estudio de Thorpe y cols. (2015, 2016) quien también recoge valores de futbolistas profesionales. Cabe recordar también que los valores de la escala de esfuerzo percibido oscilan entre 1 y 10, y que el RPE es un parámetro de carga interna de entrenamiento mientras que la escala de percepción subjetiva de bienestar se refiere al nivel de fatiga percibida por el jugador. La discusión de este punto se divide en los 4 parámetros analizados en esta tesis y las relaciones que existen entre ellos.

Los futbolistas profesionales que participaron en esta tesis jugaban en 6 equipos diferentes y la mayoría de ellos jugaban en equipos situados fuera de la provincia de Valencia. Los jugadores rellenaban los cuestionarios de bienestar y RPE y se ponían el pulsómetro de manera privada sin tener conocimiento sus respectivos clubs. Estos motivos explican que a la hora de calcular el RPE no se haya podido incluir la duración de la sesión en minutos para calcular las unidades arbitrarias, tomándose solo el valor (entre 1 y 10) que los jugadores otorgaban a cada sesión de entrenamiento, ya que estos no sabían con precisión la duración exacta de las sesiones. Tampoco se ha podido relacionar los valores de RPE o de RMSSD de esta tesis con otros parámetros de carga interna, como FC, o externa, GPS, u otros de fatiga de los jugadores, ya que no se disponía de este tipo de información. Previamente, autores como Casamichana y cols. (2013) han observado correlaciones significativas en futbolistas profesionales entre RPE y parámetros de carga externa como distancia total recorrida o con parámetros de carga interna como el TRIMP.

Una vez finalizada esta pequeña contextualización, empezaremos a discutir los resultados obtenidos respecto a RPE dentro de este punto 5.2, para posteriormente discutir los resultados obtenidos en la escala de percepción subjetiva de bienestar en los siguientes puntos.

Los resultados de esta tesis muestran que existen diferencias significativas entre el valor de RPE del día de pre partido con el valor del día post -1 día y -2 días de entrenamiento. Estas diferencias parecen reflejar claramente la oscilación de cargas que se produce en los diferentes días que conforman un microciclo semanal en fútbol profesional. Nuestros resultados coinciden con los de Oliveira y cols. (2019) y difieren de los resultados observados por Malone y cols. (2015) en futbolistas profesionales, que

solo encontraron diferencias significativas en el valor de RPE entre el día de partido y el resto de días del microciclo.

Observando los valores de RPE de esta tesis, que coinciden con numerosos estudios realizados con futbolistas profesionales como el de Thorpe y cols. (2016), o el de Clemente y cols. (2017), se pueden clasificar los diferentes tipos de día del microciclo en el período competitivo de una temporada en 3 bloques; bloque de recuperación, bloque de cargas altas y bloque de preparación del partido. Por otro lado, Jeong, Reilly, Morton, Bae y Drust (2011) observaron en 22 futbolistas profesionales como el valor de RPE de los microciclos del período preparatorio eran más altos que los registrados en el período competitivo y que los valores de RPE del período preparatorio no se podían clasificar en los 3 bloques mencionados anteriormente. La razón puede residir en que el período preparatorio las cargas de los entrenamientos son muy similares entre los días y no presentan diferencias tan grandes entre ellos como ocurre en el período competitivo.

El bloque de recuperación estaría formado por los dos días posteriores al partido. El entrenamiento del día posterior al partido sería el día con la carga más baja del microciclo como se puede comprobar en los resultados. Después de este entrenamiento regenerativo, habría un día sin entrenamiento lo que explica que este bloque de recuperación sea el bloque con una carga más baja del microciclo.

El bloque de cargas altas empezaría después del bloque de recuperación y estaría formado por los días más alejados de la competición, post 1, 2 días de entrenamiento, que se caracterizan por unas cargas altas.

Finalmente se encuentra el bloque de preparación del partido, que se caracteriza por unas cargas bajas. Este bloque estaría formado por el entrenamiento de los dos días previos al partido y tendría por objetivo que el futbolista llegará en las mejores condiciones posibles al partido.

5.3 Percepción subjetiva de nivel de fatiga según el tipo de día

Cabe recordar que si existían diferencias significativas entre los días analizados respecto al nivel de fatiga percibida que presentaban los jugadores los diferentes tipos de día. Estas diferencias significativas se encontraban entre el post 1 día de descanso y el post partido >45 minutos, el post 3 días de entrenamiento y el post partido >45 minutos, el día de pre partido y el post partido >45 minutos y finalmente entre los valores del día de partido y el post partido >45 minutos, lo que divide claramente el microciclo semanal en 4 bloques.

El primer dato a destacar, es el hecho que el pico de fatiga se produce entre las 24-48 horas después del partido, momento a partir del que empieza a reducirse, siendo el nivel de percepción de fatiga del día post partido >45 minutos mayor que el del día post 3 entrenamientos, lo que muestra que el partido es el acontecimiento que produce mayores niveles de fatiga percibida. Este resultado coincide con los estudios de Cheung, Hume y Maxwell (2003), Fatouros y cols. (2010) y los realizados por Nédelec y cols. (2014) (en 10 futbolistas profesionales) que observaron un pico de fatiga entre 24 y 48 horas después de una competición. Estos últimos autores realizaron test, de manera paralela al cuestionario de percepción subjetiva de bienestar, para comprobar la fatiga neuromuscular, como el salto con contra movimiento, máxima contracción isométrica de cuádriceps etc. En esta tesis no se pudo realizar ninguno tipo de test paralelo al cuestionario de bienestar al día siguiente del partido, por motivos de localización de los jugadores.

A continuación, se explican los 4 bloques que se aprecian claramente dentro del microciclo si se tienen en cuenta los diferentes valores de percepción subjetiva del nivel de fatiga y las diferencias significativas que existen entre los distintos días.

El primer bloque de días es el día de partido donde los jugadores presentan los niveles de fatiga más bajos, lo que significa que el proceso de *tapering* se realizaba correctamente en sus equipos.

El segundo bloque o bloque post partido está formado por el día post partido >45 minutos que presenta un pico en el nivel de fatiga y que coincide con los estudios mencionados anteriormente (Cheung, Hume y Maxwell, 2003; Nédelec y cols., 2014).

El tercer bloque o bloque de entrenamiento está formado por los días que comprenden desde post 1 día de descanso hasta el post 3 días de entrenamiento. Los valores de estos días suelen presentar pocas oscilaciones debido a que las cargas suelen ser muy similares entre días de entrenamiento. A su vez, la percepción de fatiga de este bloque es menor que el bloque post partido pero mayor que el bloque de preparación

Finalmente se encuentra el bloque de preparación que está formado por el día previo al partido y que presenta niveles de fatiga más bajos que el bloque de entrenamiento. Este hecho se produce debido a que los niveles de fatiga van disminuyendo a medida que se acerca el partido, y coincide con los estudios realizados por Moalla y cols. (2016) y Thorpe y cols. (2016) con jugadores profesionales.

5.4 Percepción subjetiva de calidad de sueño según el tipo de día

Los resultados de esta tesis sobre la calidad de sueño muestran que no existen diferencias significativas entre los distintos tipos de día analizados, y tampoco existen diferencias entre los días agrupados en el grupo de antes y en el grupo de después del partido. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Nédelec y cols. (2013) que tras un partido simulado con futbolistas profesionales no encontraron diferencias en los niveles de calidad del sueño 1,2, y 3 días después de este, entre los valores de calidad de sueño de antes y después del partido. Por otro lado, los resultados de esta tesis no coinciden con los obtenidos por Nédelec y cols. (2015) y Thorpe y cols. (2016) con futbolistas profesionales, ya que estos autores si encontraron diferencias significativas entre algunos días que forman el microciclo semanal.

A pesar que las diferencias no son significativas en cuanto a calidad del sueño, se puede observar 3 períodos diferentes teniendo en cuenta los valores de calidad de sueño obtenidos en los diferentes tipos de día del microciclo. Los días que se sitúan antes del partido tienen valores muy similares, menos el día post 4 días de entrenamiento, que presenta un valor un poco más alto de calidad. Este aumento puede deberse a que la fatiga

y cansancio acumulado después de realizar 4 entrenamientos pueda favorecer la calidad del sueño.

A continuación, se encuentran los días pre partido y partido que presentan un valor de calidad más bajo lo que puede deberse al estrés pre partido (Nédelec y cols., 2015). Finalmente, está el período de después del partido en el que se observa como el valor del post partido >45 minutos es el valor más bajo de la semana, igual que el resultado obtenido por Nédelec y cols. (2015) y Thorpe y cols. (2016) en futbolistas profesionales, para a partir de ahí mejorar un poco en el día post entrenamiento compensatorio. Este descenso en la calidad del sueño puede deberse a la fatiga, daño muscular o el estrés generado por el propio partido.

5.5 Percepción subjetiva del estado muscular según el tipo de día

Cabe recordar que si existían diferencias significativas entre los días analizados respecto al estado muscular que presentaban los jugadores los diferentes tipos de día. Estas diferencias significativas se encontraban entre el día de partido y el día post partido >45 minutos. Teniendo en cuenta estos datos significativos, y los valores de estado muscular de los otros días, se puede dividir la semana en 3 grupos de días, el grupo con los días de antes del partido, otro grupo con el día de partido y un tercer grupo con el día post partido >45 minutos. En los días de antes del partido el estado muscular presenta unos valores similares entre los días. A medida que se acerca el partido el valor de estado muscular aumenta positivamente hasta su valor máximo en el día de partido, como consecuencia de la disminución de las cargas de entrenamiento. Finalmente, el día post partid >45 minutos representa el tercer grupo, presentando el valor más bajo de estado muscular debido a las consecuencias de la competición.

Los jugadores de este estudio presentan el mayor daño muscular el día después del partido coincidiendo con los resultados del estudio de Cheung, y cols. (2003), Krstrup y cols. (2011), Thorpe y cols. (2015, 2016), Oliveira y cols. (2019) y Ispirlidis y cols. (2008) (realizados todos ellos con jugadores profesionales igual que en esta tesis), pero no coinciden con el estudio de Davies, Eston, Fulford, Rowlands, y Jones (2011) que afirman que el daño comienza 24 horas tras el partido y alcanza su pico 48 horas después del mismo. Por el contrario, los jugadores presentan el mejor estado muscular el

día de partido, es decir, llegan en muy buen estado muscular a la competición, lo que muestra un buen *tapering* o una buena distribución de cargas por sus respectivos cuerpos técnicos durante el microciclo, al igual que ocurre en el estudio de Krstrup y cols. (2011) con jugadores profesionales daneses.

Tras comprobar que el valor más alto de daño muscular se obtiene el día después del partido, sería interesante que los cuerpos técnicos de los equipos pudieran introducir protocolos de recuperación después del partido para acelerar la recuperación fisiológica y metabólica para tratar de disminuir las molestias musculares del día siguiente. Dentro de este protocolo sería importante introducir inmersiones en agua fría que reducen la inflamación muscular y reactivan la actividad del sistema nervioso parasimpático (Douglas y cols., 2016). Esa reducción de molestias musculares se relaciona significativamente con la calidad de sueño y nivel de fatiga en esta tesis, lo cual hace entender que, si el jugador va a la cama con menos molestias musculares, la calidad de su sueño será más elevada y por lo tanto los niveles subjetivos de calidad de sueño pueden ser mayores. A pesar de los beneficios de realizar este protocolo post partido, no resulta fácil de realizar en futbolistas profesionales, ya que la realización de este o no depende muchas veces de su estado anímico o de sus compromisos sociales. Una posible solución, a medio o largo plazo, sería introducir los protocolos de recuperación post partido en las categorías inferiores de los equipos, ya que así los jugadores estarían acostumbrados a realizarlos al acabar los partidos y serían conscientes y se darían cuenta de los beneficios que obtienen de la realización de este protocolo.

5.6 Valores de RMSSD en cada tipo de día del microciclo

A día de hoy no se han descrito publicaciones en las que se analice la HRV en distintos tipos de día de un microciclo durante todo el período competitivo de una temporada en el fútbol profesional. Algunos artículos como el de Naranjo y cols. (2015a) y Vilamitjana y cols. (2014) han registrado la HRV en futbolistas profesionales durante el período competitivo, pero a diferencia de este estudio, solo realizaban un registro semanal. Por otro lado, otros autores como Botek y cols. (2014), Boullosa y cols. (2013), Thorpe y cols. (2016) y Flatt y cols. (2017a) han registrado la HRV en hombres y mujeres futbolistas durante un período concreto, como pretemporada o 3-4 semanas del período competitivo, pero no han comentado el valor de HRV de cada tipo de día.

Si se analiza el RMSSD de los distintos tipos de día se observa que no hay diferencias significativas entre ellos, y si agrupamos todos los días en dos grupos, después del partido (post partido > 45 minutos y post entrenamiento regenerativo) y antes del partido (el resto de días analizados) si aparecen diferencias significativas. Esto puede deberse a varias razones.

En primer lugar, aunque no ocurre en esta tesis, parece coherente pensar que los valores de RMSSD del día de partido deberían de ser los más altos de los diferentes tipos de día que forman un microciclo, ya que el objetivo de todos los cuerpos técnicos es que los jugadores lleguen en el mejor estado posible a la competición y con los valores más bajos de fatiga. En realidad, posiblemente los jugadores lleguen normalmente en el mejor estado a la competición a nivel muscular y a nivel de fatiga, pero el valor de RMSSD suele descender el día de partido o pre partido relacionándose este descenso en la actividad parasimpática con el estrés pre competitivo (D'Ascenzi y cols., 2014; Mateo, Blasco-Lafarga, Martínez-Navarro, Guzmán, Zabala, 2012). Relacionado con el estrés pre competitivo, se ha observado en un futbolista al que se le ha seguido registrando la HRV en temporadas posteriores, que sus valores de RMSSD el día de partido y pre partido solían ser inferiores cuando jugaba en primera división que cuando jugaba en segunda a pesar que él jugaba en el mismo equipo. Esto refuerza la idea que el estrés precompetitivo pueda alterar los registros de RMSSD y pueda afectar de manera diferente a los futbolistas.

Por otro lado, parecería lógico pensar también que los valores de RMSSD del día post 1 día de descanso fueran mucho más altos y diferentes significativamente al resto. El hecho que no lo sean puede deberse a que el jugador pueda necesitar más de 72 horas para obtener valores más altos, ya que en el momento del registro matinal no habrían pasado esas 72 horas; por ejemplo, si juega domingo tarde noche, lunes mañana hace un entrenamiento regenerativo, martes descansa y miércoles mañana se realiza el registro. En comparación a lo que sucede con RMSSD, también se ha demostrado en varios estudios el hecho que los futbolistas puedan necesitar más de 72 para obtener valores de estado muscular, inflamación o parámetros de rendimiento previos al partido (Ispiridis y cols., 2008; Magalhães y cols., 2010).

Otra explicación al hecho que los valores de RMSSD del día post 1 de descanso no sean más altos se puede deber a que los futbolistas no realizan ningún tipo de entrenamiento muscular el día de descanso, pero si que lo destinan a realizar gran variedad de actividades de su vida diaria con lo que el nivel de actividad que tienen ese día es alto, olvidando que ese día está destinado a su recuperación.

Hay que tener también en cuenta que los jugadores profesionales tienen un nivel condicional muy alto y que sufren menos fluctuaciones durante los microciclos, tanto en la HRV como en las escalas de percepción subjetiva de bienestar, que deportistas con un menor nivel condicional menor (Flatt y Esco 2016b; Plews y cols., 2013). De hecho, se necesitan solo 3 registros semanales de HRV en estos para que el valor de la HRV semanal sea fiable a diferencia de los deportistas amateurs que necesitan realizar 5 registros semanales para poder comparar las medias semanales (Plews y cols., 2013). Otro motivo que pueda explicar la no existencia de diferencias significativas entre días es el hecho que autores como Buchheit (2014), Flatt y Esco (2016b), Plews y cols. (2013) han demostrado que se debería comparar el valor de RMSSD semanal y no el diario de HRV, ya que el RMSSD semanal refleja mejor las diferentes fluctuaciones que se producen en el SNA debido a las cargas de entrenamiento o competición y que el valor diario de RMSSD puede estar afectado por numerosos factores.

Otro motivo que puede explicar esta falta de diferencias significativas entre días reside en el hecho que en fútbol profesional se compite semanalmente en liga por lo que no existen diferencias tan grandes de cargas entre los distintos tipos de día durante un microciclo. En otros deportes, en los que se compite con menor frecuencia si que pueden aparecer diferencias significativas en RMSSD ya que los volúmenes de carga son más elevados.

Finalmente, parece normal que haya diferencias significativas entre los días previos al partido y los días posteriores al partido, ya que el partido representa para el jugador la carga interna y externa más alta de la semana. (Cheung y cols., 2003, Krstrup y cols., 2011; Thorpe y cols., 2015, 2016, Oliveira y cols., 2019; Nédelec y cols., 2014). Este hecho aumenta la importancia de intentar iniciar la recuperación post partido justo al acabar este, con una buena suplementación e inmersiones en agua fría como recomiendan autores como Douglas y cols. (2016), Buchheit y cols. (2009) que han

demostrado que estas inmersiones favorecen la reactivación del SNAp y que los valores de HRV posteriores a estas son más altos.

5.7 Relación entre los valores diarios de HRV y los indicadores del cuestionario de percepción subjetiva de bienestar y RPE

Después de analizar y discutir las variables de RPE, calidad de sueño, fatiga y estado muscular de manera individual según el tipo de día se realizó la prueba de Spearman para comprobar las correlaciones que existían entre ellas y RMSSD.

Los resultados de esta tesis mencionados anteriormente muestran claramente como el partido es el día de la semana con un índice de carga más elevado, ya que se produce un descenso en el valor de RMSSD y hay un incremento significativo a posteriori de la percepción de daño muscular y nivel de fatiga, pero este no afecta a la variable de calidad de sueño.

En cuanto a las relaciones más representativas se obtuvo una correlación significativa positiva alta entre el estado muscular y el nivel de fatiga y entre calidad de sueño y nivel de fatiga. También se obtuvo una correlación significativa positiva baja entre estado muscular y calidad de sueño y entre el nivel de fatiga y RMSSD.

Como se puede observar en el párrafo anterior, todas las variables analizadas están relacionadas entre si de una manera u otra. Los resultados coinciden con los obtenidos por Moalla y cols. (2016) en futbolistas profesionales, que muestra relaciones significativas entre carga de entrenamiento, RPE, calidad de sueño, nivel de fatiga y estado muscular.

La primera correlación alta entre estado muscular y nivel de fatiga parece normal y entendible, ya que cuando los jugadores tienen menos niveles de fatiga se encuentran en un estado muscular mejor normalmente. Por otro lado, destaca la relación también alta entre calidad del sueño y nivel de fatiga, entendiéndose que cuanto mejor duermen los jugadores, parece ser que recuperan más y sus percepciones subjetivas de fatiga son mejores. Este hecho parece normal ya que la fase del sueño es uno de los momentos más eficaces de recuperación cerebral y muscular en las personas en general, y en los

deportistas en concreto (Leeder, Glaister, Pizzoferro, Dawson y Pedlar, 2012; Halson, 2014b)

Dada la importancia que tiene la fase del sueño en la recuperación general del deportista, y dadas las relaciones que se muestran en esta tesis en jugadores profesionales de la calidad del sueño con otros parámetros subjetivos de bienestar como son el nivel de fatiga y estado muscular, parece obvio pensar que la monitorización, análisis y mejora de la fase del sueño pueda ser el siguiente reto que se les presente a los cuerpos técnicos de los equipos profesionales de fútbol (Nédelec y cols., 2015). Cabe recordar que el sueño se está analizando a través de la información obtenida de la HRV, o por el movimiento del deportista durante la fase de sueño (Cameron y Bird, 2015). Algunos equipos profesionales, como por ejemplo Manchester United, Arsenal, Chelsea o Liverpool entre otros, han empezado ya a trabajar en esta dirección, y después de nuestra experiencia trabajando con jugadores profesionales, se ha visto que es clave que los jugadores entiendan que han de dormir el tiempo necesario, pero que también la calidad del sueño es muy importante ya que normalmente los deportistas no suelen tener buenos niveles de calidad de sueño (Halsn, 2014b). Es por ello que se ha de tratar de introducir rutinas básicas en su día de día que puedan favorecer el aumento del tiempo y calidad de la fase de sueño. Los futbolistas profesionales suelen realizar siestas largas con el objetivo de favorecer la recuperación de la sesión matutina, pero a su vez, no se dan cuenta que la duración de estas va a influir decisivamente en una mayor dificultad para conciliar el sueño por la noche; es por ello que los jugadores deberían reducir la duración de sus siestas. Otro aspecto que puede ayudar a conciliar el sueño es el tipo de alimentos y líquidos que se ingieren en la cena (Halsn, 2014b). Otra estrategia que puede ayudar a mejorar la calidad y cantidad del sueño es la eliminación de los dispositivos móviles que tiene el jugador alrededor de él 1 hora antes de irse a la cama a dormir e irse a la cama a una hora similar todos los días (Claudino y cols., 2019). Si se consigue que los jugadores adapten estos protocolos en sus vidas cotidianas parece normal que sus niveles de calidad de sueño aumenten, mejorando así sus niveles subjetivos de percepción de fatiga.

Siguiendo con las correlaciones, existe una correlación positiva significativa baja entre el estado muscular y la calidad del sueño. Aquí aparece otra variable clave, el estado muscular que tenga el jugador, que afecta de una manera importante a la calidad del sueño y a los niveles de fatiga. Ante estos resultados, parece claro que tras el entrenamiento o

partido el jugador ha de intentar acelerar la recuperación muscular con suplementación, tratamiento de fisioterapia y con inmersiones en agua fría, que reducen la inflamación muscular y han demostrado que reactivan la actividad parasimpática (Buchheit y cols., 2009; Douglas y cols., 2016; Flatt y Esco, 2016a). Tras esta relación, parece ser que si las molestias musculares son menores los niveles de percepción subjetiva de calidad de sueño aumentarían porque la calidad del sueño de los futbolistas será mayor.

Por otro lado, también existe una correlación positiva significativa baja entre percepción subjetiva de nivel de fatiga y RMSSD, parámetro objetivo que indica los niveles de fatiga, lo cual muestra que la sensación de dormir mejor se asocia a valores más altos de RMSSD.

Como conclusión, se puede decir que la recuperación muscular después de un entrenamiento o partido es clave y el inicio de un proceso de recuperación general donde reduciendo estas molestias musculares se mejorarán parámetros de percepción subjetiva de fatiga y calidad del sueño, pero también un parámetro objetivo de fatiga como es RMSSD, reduciéndose así los niveles de fatiga del jugador y facilitando el proceso de asimilación de cargas.

Por otro lado, se obtuvo una correlación significativa negativa baja entre RPE y RMSSD y entre RPE y el nivel de fatiga. Esta relación negativa de RPE con RMSSD y con el nivel de fatiga parece totalmente lógica y entendible ya que cuanto más intensas son las sesiones de entrenamiento, el valor de RMSSD, parámetro objetivo de fatiga, desciende, y la percepción subjetiva del nivel de fatiga del jugador aumenta. Esta correlación coincide con otros estudios, realizados con nadadores, atletas o futbolistas universitarios de Estados Unidos (Baumert y cols., 2006; Flatt y cols., 2017b; Flatt y cols., 2017c) y con numerosos estudios realizados con futbolistas profesionales, mencionados en el apartado 1.2 (Haddad y cols., 2017; Impellizzeri y cols., 2004) o en la discusión como Oliveira y cols. (2019) o Moalla y cols. (2016). Todos estos autores han demostrado que incrementos significativos en las cargas de entrenamiento producen descensos en los valores de RMSSD y aumentan los niveles de percepción de fatiga.

5.8 Fortalezas y limitaciones

Esta tesis presenta una fortaleza grande cuando se compara con estudios parecidos que se han realizado previamente con futbolistas profesionales, ya que hasta la fecha no se ha publicado ningún estudio similar al nuestro. Las razones de esta fortaleza son varias:

- La diversidad de procedencia de nuestros jugadores, y por tanto, características de los entrenamientos, resultados, y otras variables que pueden influir en los resultados. Los futbolistas que participaron en este estudio jugaban en equipos diferentes, con dinámicas de equipo y formas de entrenamiento diferentes.
- Por otro lado, nuestro estudio se realizó durante todo el período competitivo, 9 meses, que es un período de competición largo (Impellizzeri, Rampinini y Marcora, 2005) con diferentes cargas de entrenamiento, diferente densidad competitiva y con diferentes tipos de día de entrenamiento durante todo el período a diferencia de muchos estudios sobre la HRV en futbolistas profesionales que lo realizaron durante pretemporada o durante períodos cortos de 2-3 semanas durante el período competitivo (Boullosa y cols., 2013; Thorpe y cols., 2015; Ravé y Fortrat, 2016).

Las limitaciones existentes en esta investigación se enumeran a continuación:

- La cantidad de la muestra, a pesar que se trata de jugadores profesionales. Sin embargo, la realización de este estudio en más equipos y con más jugadores permitiría la generalización de las conclusiones establecidas.
- La dificultad en la toma de ciertos datos con los jugadores debido primero a que algunos no residían en la misma provincia que el autor de la tesis y también a que muchas veces olvidaban rellenar los cuestionarios o ponerse el pulsómetro, algo normal en deportistas profesionales y en estudios tan largos como este.

5.9 Aplicaciones prácticas

Los resultados obtenidos en esta tesis pueden contribuir a establecer un nuevo protocolo para el registro de RMSSD en el fútbol profesional. A su vez, los resultados de esta tesis ayudan a resolver el problema de tiempo al que se enfrentan los cuerpos técnicos

de los equipos cuando quieren registrar la HRV a los más de 20 jugadores que suelen formar una plantilla usando el protocolo 5+5 (sobretudo durante el período competitivo).

La reducción del tiempo necesario para registrar RMSSD puede ayudar a los cuerpos técnicos a obtener de una manera no invasiva valores objetivos diarios o casi diarios, los cuales no pueden ser alterados voluntariamente por el jugador, a diferencia de otros como por ejemplo las escalas de RPE o los cuestionarios de bienestar.

Sería interesante y aconsejable que los miembros de los cuerpos técnicos analizaran los valores de HRV junto a otros parámetros fisiológicos y psicológicos con el objetivo de construir un perfil más global e individual de cada jugador, que les permita entender como cada jugador asimila las diferentes cargas de entrenamiento y conocer así de una manera más precisa sus niveles de fatiga.

Finalmente, otra aplicación práctica que surge de observar las distintas relaciones que existen entre todas las variables estudiadas, es que parece importante y recomendable, introducir un protocolo de recuperación justo al acabar el partido o los entrenamientos, que permita disminuir las molestias musculares y reactivar la actividad vagal. Si este se realiza correctamente, se puede conseguir que la percepción subjetiva de calidad del sueño del futbolista sea mayor, su percepción de nivel de fatiga sea menor y que el valor de RMSSD aumente, lo que provocará que el proceso de recuperación sea más efectivo y por tanto los niveles de fatiga puedan ser menores.

6. Conclusiones

A continuación, se presentan las conclusiones del trabajo realizado. Se presentarán siguiendo la lógica argumental seguida al presentar los objetivos de estudio.

Conclusiones relacionadas con el objetivo 1:

Se demuestra la validez de registros ultra-cortos de RMSSD de 1 minuto de duración en posición supina con al menos 1 minuto de estabilización previa para conocer la variabilidad de la frecuencia cardíaca de futbolistas profesionales durante el período competitivo de una temporada, quedando demostrado que:

- a. El valor del registro ultra-corto obtenido sin ningún tiempo de estabilización previo al registro es diferente a los valores obtenidos con uno o más minutos de estabilización previa.
- b. Los valores los registros ultra-cortos de un minuto de duración obtenidos con más de un minuto de tiempo de pre-estabilización presentan un alto nivel de concordancia con el valor del registro referencia-criterio, mientras que el registro ultra-corto de la misma duración de 1 minuto sin ningún tiempo de estabilización previo sobreestima el valor del registro referencia-criterio.

Por lo tanto, los registros ultra-cortos de un minuto de duración son válidos para valorar la HRV en futbolistas profesionales durante el período competitivo siempre que se obtengan con al menos un minuto de estabilización previa.

Conclusiones relacionadas con el objetivo 2:

Se demuestra que tanto la carga de entrenamiento como los indicadores de respuesta del jugador a este estímulo (RMSSD y estado de bienestar) se modifican de manera significativa en función del día de entrenamiento en según la proximidad al día del partido, comprobándose que, el día con menor

carga de entrenamiento es el día pre partido, siendo el día postpartido el que los jugadores refieren peores percepciones tanto de fatiga como de estado muscular, así como también se registra mayor variabilidad de frecuencia cardíaca el conjunto de días previos al partido que los subsiguientes, mientras que no existe diferencia en la percepción de calidad del sueño.

Conclusiones relacionadas con el objetivo 3:

El esfuerzo percibido del día anterior tiene una relación negativa con la HRV del día siguiente y positiva con la percepción de fatiga del mismo.

Además, la percepción del nivel de fatiga se relaciona de manera positiva con calidad de sueño y estado muscular, siendo los mayores coeficientes de correlación aquellos que relacionan nivel de fatiga con el estado muscular y con la percepción de calidad de sueño.

7. Referencias bibliográficas

- Abad, C., Kobal, R., Kitamura, K., Gil, S., Pereira, L., Loturco, I., y Nakamura, F. (2017). Heart rate variability in elite sprinters: effects of gender and body position. *Clinical Physiology & Functional Imaging*, 37(4), 442-47. <https://doi.org/10.1111/cpf.12331>.
- Akenhead, R., Harley, J., y Twedde, S. (2016). Examining the external training load of an English premier league football team with special reference to acceleration. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 30(9), 2424-32.
- Akubat, I., Patel, E., Barrett, S., y Grant, A. (2012). Methods of monitoring the training and match load and their relationship to changes in fitness in professional youth soccer players. *Journal of Sports Sciences*, 30(14), 1473-80.
- Al Haddad, H., Laursen, P., Chollet, D., Ahmaidi, S., y Buchheit, M. (2011). Reliability of resting and postexercise heart rate measures. *International Journal of Sports Medicine*, 32(8), 598-605.
- Al Haddad H, Parouty J, Buchheit M. (2012). Effect of daily cold-water immersion on heart rate variability and subjective ratings of well-being in highly trained swimmers. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 7(1):33-8.
- Al Haddad, M., Chaouachi, A., Wong, D., Castagna, C., Hambli, M., Hue, O., y Chamari, K. (2014). Influence of fatigue, stress, muscle soreness and sleep on perceived exertion during submaximal effort. *Physiology & Behavior*, 119, 185-89.
- Al Haddad, M., Stylianides, G., Djaoui, L., Dellal, A., y Chamari, K. (2017). Session-RPE method for training load monitoring: validity, ecological usefulness, and influencing factors. *Frontiers in Neuroscience*, 11, 612.
- Alexiou, H., y Coutts, A. (2008). A comparison of methods used for quantifying internal training load in women soccer players. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 3(3), 320-30.
- Amann, M. (2011). Central and peripheral fatigue: interaction during cycling exercise in humans. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43(11), 2039-45 <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31821f59ab>.

- Andersson, H., Ekblom, B., y Krstrup, P. (2008). Elite football on artificial turf versus natural grass: movement patterns, technical standards, and player impressions. *Journal of Sports Sciences*, 26(2), 113-22.
- Ani, M., Munir, S., White, M., Townend, J., y Coote, J. (1996). Changes in R-R variability before and after endurance training measured by power spectral analysis and by the effect of isometric muscle contraction. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 74 (5), 397-403.
- Armstrong, L., y Van Heest, J. (2002). The unknown mechanism of the overtraining syndrome: clues from depression and psychoneuroimmunology. *Sports Medicine*, 32(3), 185-209.
- Aubert, A., Seps, B., y Beckers, F. (2003). Heart rate variability in athletes. *SportsMedicine* 33(12), 889-919.
- Badin, O., Smith, M., Conte, D., y Coutts, A. (2016). Mental fatigue: impairment of technical performance in small sided soccer games. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 11(8), 1100-1105.
- Bangsbo, J. (1994). The physiology of soccer with special reference to intense intermittent exercise. *Acta Physiologica Scandinavica*, 619, 1-155.
- Banister, E. W. (1991). Modeling elite athletic performance. En: *Physiological Testing of Elite Athletes*, H. Green, J. McDougal, y H. Wenger (Eds.). Champaign: Human Kinetics, 1991, pp. 403–424.
- Baumert, M., Brechtel, L., Lock, J., Hermsdorf, M., Wolff, R., Baier, V., y Voss, A. (2006). Heart rate variability, blood pressure variability, and baroreflex sensitivity in overtrained athletes. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 16(5), 412–417
- Bland J, Altman D. (1986). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet*. 1(8476),307-310.
- Bellenger, C., Karavirta, L. Thomson, R., Robertson, E., Davison, K., y Buckley, J. (2015). Cotextualising parasympathetic hyperactivity in functionally overreached athletes with perceptions of training tolerance. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 11(7), 685–692.
- Bellenger, C., Karavirta L., Thomson, R., Robertson., E., Davison, K., y cols. (2016). Contextualizing parasympathetic hyperactivity in functionally overreached athletes with

- perceptions of training tolerance. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 11(5), 685-92.
- Boksem, M., Theo, S., Meijman, F., y Lorist, M. (2005). Effects of mental fatigue on attention: an ERP study. *Cognitive Brain Research*, 25(1), 107-16.
- Bonaduce, D., Petretta, M., Cavallaro, V., Apicella, C., Ianniciello, A., Romano, M., Breglio, R., y Marciano, F. (1998). Intensive training and cardiac autonomic control in high level athletes. *Medicine and Science in Sports & Exercise*, 30 (5), 691-96.
- Borg, G. (1962). A simple rating scale for use in physical work test. *Kungliga fysiografiska sällskapet i Lund Forhandlignen*, 32, 7-15.
- Borg, G., Hassmén, P., y Lagerström, M. (1987). Perceived exertion related to heart rate and blood lactate during arm and leg exercise. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 56(6), 679-85.
- Borresen, J., y Lambert, M. (2008). Autonomic control of heart rate during and after exercise : measurements and implications for monitoring training status. *Sports Medicine*, 38(8), 633-46.
- Bosquet, L., Papelier, Y., Léger, Y., y Legros, P. (2003). Night heart rate variability during overtraining in male endurance athletes. *The Journal of Sports Medicine & Physical Fitness*, 43(4), 506-12.
- Botek, M., Krejčí, J., y Weisser, R. (2014). Autonomic cardiac regulation and morpho-physiological responses to eight week training preparation in junior soccer players. *Acta Gymnica*, 44(3): 155-63.
- Botek, M., Krejčí, J., McKune, A., y Klimešová, I. (2016). Somatic, endurance performance and heart rate variability profiles of professional soccer players grouped according to age. *Journal of Human Kinetics* volume 54, 65-74 <https://doi.org/10.1515/hukin-2016-0035>
- Boullosa, D., Abreu, L., Nakamura, F., Muñoz, V., Dominguez, E., y Leicht, A. (2013). Cardiac autonomic adaptations in elite Spanish soccer players during preseason. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 8(4), 400-409.
- Bourdillon, N., Schmitt, L., Yazdani, S., Vesin, J., y Millet, G. (2017). Minimal window duration for accurate HRV recording in athletes. *Frontiers in Neuroscience*, 11, 456-456. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00456>.

- Bradley, S., Di Mascio, M., Peart, D., Olsen, P., y Sheldon, B. (2010). High-intensity activity profiles of elite soccer players at different performance levels. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(9), 2343-51. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181aeb1b3>.
- Bradley, S., y Noakes, T. (2013). Match running performance fluctuations in elite soccer: Indicative of fatigue, pacing or situational influences? *Journal of Sports Sciences*, 31(15), 1627-38.
- Bradley, S., Sheldon, W., Wooster, B., Olsen, P., Boanas, P., y Krstrup, P. (2009). High-intensity running in English FA Premier League soccer matches. *Journal of Sports Sciences*, 27(2), 159-68.
- Bricout, V., Dechenaud, S., y Favre-Juvin, A. (2010). Analyses of heart rate variability in young soccer players: the effects of sport activity. *Autonomic Neuroscience: Basic & Clinical*, 154(1-2), 112-16. <https://doi.org/10.1016/j.autneu.2009.12.001>.
- Buchheit, M., Peiffer, J., Abbiss, C., y Laursen, P. (2009). Effect of cold water immersion on postexercise parasympathetic reactivation. *American Journal of Physiology. Heart and Circulatory Physiology*, 296(2), 421-27. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.01017.2008>.
- Buchheit, M., Chivot, A., Parouty, J., Mercier, D., Al Haddad, H., Laursen, P., y Ahmaidi, S. (2010a). Monitoring endurance running performance using cardiac parasympathetic function. *European Journal of Applied Physiology*, 108(6), 1153-67.
- Buchheit, M., Mendez-Villanueva, A., Quod, M., Poulos, N., y Bourdon, P. (2010b). Determinants of the variability of heart rate measures during a competitive period in young soccer players. *European Journal of Applied Physiology*, 109(5), 869-78.
- Buchheit, M., Simpson, M., Al Haddad, H., Bourdon, P., y Mendez-Villanueva, A. (2012). Monitoring changes in physical performance with heart rate measures in young soccer players. *European Journal of Applied Physiology*, 112(2), 711-23.
- Buchheit, M., Racinais, S., Bilsborough, J., Bourdon, P., Voss, S., Hocking, J., Cordy, J., Mendez-Villanueva, A., y Coutts, A. (2013). Monitoring fitness, fatigue and running performance during a pre-season training camp in elite football players. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 16(6), 550-55.
- Buchheit, M. (2014). Monitoring training status with HR measures: do all roads lead to Rome? *Frontiers in physiology*, 5,73. <https://doi.org/10.3389/fphys.2014.00073>.

- Buchheit, M. (2015). Sensitivity of monthly heart rate and psychometric measures for monitoring physical performance in highly trained young handball players. *International Journal of Sports Medicine*, 36(5), 351-56.
- Cameron, M. y Bird, S. (2015). Sleep monitoring in elite athletes: A brief review of smartphone applications and recommendations. *The Journal of Australian Strength and Conditioning* 23(5), 66-76.
- Carling, C., Bradley, P., McCall, A., y Dupont, G. (2016). Match-to-match variability in high-speed running activity in a professional soccer team. *Journal of Sports Sciences*, 34(24), 2215-23.
- Carling, C., y Dupont, G. (2011). Are declines in physical performance associated with a reduction in skill-related performance during professional soccer match-play? *Journal of Sports Sciences*, 29(1), 63-71.
- Casamichana, D., Castellano, J., Calleja J., San Román, J., y Castagna, C. (2013). Relationship between indicators of training load in soccer players. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(2), 369-74. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3182548af1>.
- Castagna, C., Impellizzeri, F., Cecchini, E., Rampinini, E., y Barbero, J. (2009). Effects of intermittent-endurance fitness on match performance in young male soccer players. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 23(7), 1954-59.
- Cataldo, A., Zangla, D., Cerasola, D., Vallone, V., Grusso, G., Lo Presti, R., y Traina, M. (2016). Influence of baseline heart rate variability on repeated sprint performance in young soccer players. *The Journal of Sports Medicine & Physical Fitness*, 56(4), 491-96.
- Chen, J., Yeh, D., Lee, J., Chen, Y., Huang, C., Lee, S., y Chen, C. (2011). Parasympathetic nervous activity mirrors recovery status in weightlifting performance after training. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 25(6), 1546-52.
- Cheung, K., Hume, P., & Maxwell, L. (2003). Delayed onset muscle soreness :treatment strategies and performance factors. *Sports Medicine*, 33(2), 145–164
- Claudino, J. G., J Gabbet, T., de Sá Souza, H., Simim, M., Fowler, P., de Alcantara Borba, D., P Nassis, G. (2019). Which parameters to use for sleep quality monitoring in team sport athletes? A systematic review and meta-analysis. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 5(1), e000475. <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2018-000475>.

- Clemente, F. M., Mendes, B., Nikolaidis, P. T., Calvete, F., Carriço, S., y Owen, A. L. (2017). Internal training load and its longitudinal relationship with seasonal player wellness in elite professional soccer. *Physiology & Behavior*, 179, 262–267
- Cohen J. Statistical power analysis for the behavioral sciences (1988) 2nd edition. Lawrence Erlbaum, Hillsdale (NJ).
- Cornforth, D., Campbell, P., y Nesbitt, K. (2015). Prediction of game performance in Australian football using heart rate variability measures. *International Journal of Signal and Imaging Systems Engineering* 8(1/2):80. DOI: [10.1504/IJSISE.2015.067072](https://doi.org/10.1504/IJSISE.2015.067072)
- Costa, J., Brito, J., Nakamura, F., Oliveira, E., y Rebelo, A.. (2018). Effects of late-night training on “Slow-Wave Sleep Episode” and hour-by-hour-derived nocturnal cardiac autonomic activity in female soccer players. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 13(5), 638-44.
- Coutts, A., y Duffield, R. (2010). Validity and reliability of GPS devices for measuring movement demands of team sports. *Journal of Science & Medicine in Sport*, 13(1), 133-35.
- Davis, J., y Bailey, S. (1997). Possible mechanisms of central nervous system fatigue during exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 29(1), 45-57.
- Davies, R. C., Eston, R. G., Fulford, J., Rowlands, A. V., y Jones, A. M. (2011). Muscle damage alters the metabolic response to dynamic exercise in humans: a ³¹P-MRS study. *Journal of Applied Physiology*, 111(3), 782–790.
- Dixon, E., Kamath, M., McCartney, N., y Fallen, E. (1992). Neural regulation of heart rate variability in endurance athletes and sedentary controls. *Cardiovascular Research*, 26(7), 713-19.
- D’Ascenzi, F., Alvino, F., Natali, B. M., Cameli, M., Palmitesta, P., Boschetti, G., y Mondillo, S. (2014). Precompetitive assessment of heart rate variability in elite female athletes during play offs. *Clinical Physiology & Functional Imaging*, 34(3), 230–236.
- Douglas, J., Plews, D., Handcock, J., y Rehrer, N. (2016). The beneficial effect of parasympathetic reactivation on sympathetic drive during simulated rugby sevens. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 11(4), 480-88.
- Drust, B., Reilly, T., y Cable, N. (2000). Physiological responses to laboratory-based soccer-specific intermittent and continuous exercise. *Journal of Sports Sciences*, 18(11), 885-92.

- Duncan, M., Fowler, N., George, O., Joyce, S., y Hankey, J. (2015). Mental fatigue negatively influences manual dexterity and anticipation timing but not repeated high-intensity exercise performance in trained adults. *Research in Sports Medicine*, 23(1), 1-13.
- Earnest, C., Jurca, R., Church, T., Chicharro, J., Hoyos, J., y Lucia, A. (2004). Relation between physical exertion and heart rate variability characteristics in professional cyclists during the Tour of Spain. *British Journal of Sports Medicine*, 38(5), 568-75.
- Edmonds, R., Sinclair, W., y Leicht, A. (2013). Effect of a Training Week on Heart Rate Variability in Elite Youth Rugby League Players. *International Journal of Sports Medicine*, 34(12), 1087-92.
- Edwards, S. (1994). The heart rate monitor book. *Medicine & Science in Sports y Exercise*, 26(5), 647.
- Edwards A., Mann, M., Marfell, M., Rankin, D., Noakes, T., y Shillington, D. (2007). Influence of moderate dehydration on soccer performance: physiological responses to 45 min of outdoor match-play and the immediate subsequent performance of sport-specific and mental concentration tests. *British Journal of Sports Medicine*, 41(6), 385-91.
- Ekstrand, J., Waldén, M., y Hägglund, M. (2004). A congested football calendar and the wellbeing of players: correlation between match exposure of European footballers before the World Cup 2002 and their injuries and performances during that World Cup. *British Journal of Sports Medicine*, 38(4), 493-97.
- Esco, M., y Williford, H. (2011). Cardiovascular autonomic modulation in collegiate male basketball players. *Journal of Exercise Physiology Online*, 14(1), 35-42.
- Esco, M., y Flatt, A. (2014). Ultra-short term heart rate variability indexes at rest and post-exercise in athletes: evaluating the agreement with accepted recommendations. *Journal of Sports Science & Medicine*, 13(3), 535-541.
- Esco, M., Flatt, A., y Nakamura, F. (2017). Agreement between a smartphone pulse sensor application and electrocardiography for determining LnRmssd. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 31(2), 380-85.
- Esco, M., Williford, H., Flatt, A., Freeborn, T., y Nakamura, F. (2018). Ultra-shortened time-domain HRV parameters at rest and following exercise in athletes: an alternative to frequency computation of sympathovagal balance. *European Journal of Applied Physiology*, 118(1), 175-84.

- Ewing, D., Martyn, C., Young, R., y Clarke, R. (1985). The value of cardiovascular autonomic function tests: 10 years experience in diabetes. *Diabetes Care*, 8(5), 491-98.
- Fatouros, I., Chatzinikolaou, A., Douroudos, I., Nikolaidis, M., Kyparos, A., Margonis, K., Michailidis, Y. (2010). Time-course of changes in oxidative stress and antioxidant status responses following a soccer game. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 24(12), 3278-86.
- Fessi, M., Zarrouk, N., Di Salvo, V., Filetti, C., Barker, A., y Moalla, W. (2016). Effects of tapering on physical match activities in professional soccer players. *Journal of Sports Sciences*, 34(24), 2189-94.
- Fitts, R. (1977). The effects of exercise-training on the development of fatigue. *Annals of The New York Academy of Sciences*, 301, 424-30.
- Flatt, A., y Esco, M. (2013). Validity of the ithlete™ smart phone application for determining ultra-short-term heart rate variability. *Journal of Human Kinetics*, 39, 85-92.
- Flatt, A., y Esco, M. (2015). Smartphone-derived heart-rate variability and training load in a women's soccer team. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 10(8), 994-1000.
- Flatt, A., y Esco, M. (2016a). Evaluating individual training adaptation with smartphone-derived heart rate variability in a collegiate female soccer team. *Journal of Strength & Conditioning Research* 30(2), 378-85.
- Flatt, A., y Esco, M. (2016b). Heart rate variability stabilization in athletes: towards more convenient data acquisition. *Clinical Physiology & Functional Imaging* 36 (5): 331-36.
- Flatt, A., Esco, M., y Nakamura, F. (2017a). Individual heart rate variability responses to preseason training in high level female soccer players. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 31(2), 531–538.
- Flatt, A., Esco, M., y Nakamura, F., y Plews, D. (2017b). Interpreting daily heart rate variability changes in collegiate female soccer players. *The Journal of Sports Medicine & Physical Fitness*, 57(6), 907–915.
- Flatt, A., Hornikel, B., y Esco, M. (2017c). Heart rate variability and psychometric responses to overload and tapering in collegiate sprint-swimmers. *Journal of Science & Medicine in Sport*, 20(6), 606–610

- Foster, C., Florhaug, J., Franklin, J., Gottschall, L., Hrovatin, L., Parker, S., Doleshal, P., y Dodge, C. (2001). A new approach to monitoring exercise training. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 15 (1), 109-15.
- Furlan, R., Piazza, S., Dell'Orto, S., Gentile, E., Cerutti, S., Pagani, M., y Malliani, A. (1993). Early and late effects of exercise and athletic training on neural mechanisms controlling heart rate. *Cardiovascular Research*, 27(3), 482-88.
- Gisselman, A., Baxter, D. Wright, A., Hegedus, E., y Tumilty, S. (2016). Musculoskeletal overuse injuries and heart rate variability: Is there a link? *Medical Hypotheses*, 87, 1-7.
- Goldsmith, R., Bigger, J., Steinman, J., y Fleiss, J. (1992). Comparison of 24-hour parasympathetic activity in endurance-trained and untrained young men. *Journal of The American College of Cardiology*, 20(3), 552-58.
- Gomez-Piriz, P., Reyes, P., y Ruiz, C. (2011). Relation between total body load and session rating of perceived exertion in professional soccer players. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 25(8), 2100-2103.
- Gunnarsson, T., Bendiksen, M., Bischoff, P., Christensen, M., Lesivig, B., Madsen, K., Stephens, F., Greenhaff, P., Krstrup, P., y Bangsbo, J. (2013). Effect of whey protein- and carbohydrate-enriched diet on glycogen resynthesis during the first 48 h after a soccer game. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 23(4), 508-15.
- Halsen, S. (2014a). Monitoring training load to understand fatigue in athletes. *Sports Medicine*, 44,139-47.
- Halsen, S. (2014b). Sleep in elite athletes and nutritional interventions to enhance sleep. *Sports Medicine*, 44(Suppl 1), S13–S23
- Heathers, J. (2013). Smartphone-enabled pulse rate variability: An alternative methodology for the collection of heart rate variability in psychophysiological research. *International Journal of Psychophysiology*, 89(3), 297-304.
- Hedelin, R., Kenttä, G., Wiklund, U., Bjerle, P., y Henriksson-Larsén, K. (2000). Short-term overtraining: effects on performance, circulatory responses, and heart rate variability. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32(8), 1480-84.
- Heisterberg, F., Fahrenkrug, J., Krstrup, P., Storskov, A., Kjær, M., y Andersen, J. (2013). Extensive monitoring through multiple blood samples in professional soccer players.» *Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(5), 1260-71.

- Hellard, P., Guimaraes, F., Avalos, M., Houel, N., Hausswirth, C., y Toussaint, J. (2011). Modeling the association between HR variability and illness in elite swimmers. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43(6), 1063-70.
- Hon, E., y Lee, S. (1963). Electronic evaluation of the fetal heart rate. patterns preceding fetal death, further observations. *American Journal of Obstetrics & Gynecology*, 87, 814-26.
- Hooper, S., Mackinnon, L., Howard, A., Gordon, D., y Bachmann, A. (1995). Markers for monitoring overtraining and recovery. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 27(1), 106-12.
- Hopkins, W. (2000). Measures of Reliability in Sports Medicine and Science. *Sports Medicine*, 30(1), 1-15.
- Iellamo, F., Legramante, J., Pigozzi, F., Spataro, A., Norbiato, G., Lucini, D., y Pagani, M. (2002). Conversion from vagal to sympathetic predominance with strenuous training in high-performance world class athletes. *Circulation*, 105(23), 2719-24.
- Impellizzeri, F., Rampinini, E., Coutts, A., Sassi, A., y Marcora, S. (2004). Use of RPE-based training load in soccer. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 36(6), 1042-47.
- Impellizzeri, F., Rampinini, E., y Marcora, S. (2005). Physiological assessment of aerobic training in soccer. *Journal of Sports Sciences*, 23(6), 583-92.
- Ispirlidis, Ioannis, Fatouros, Ioannis G., Jamurtas, A. Z., Nikolaidis, M. G., Michailidis, Ioannis, Douroudos, Ioannis, Taxildaris, K. (2008). Time-course of changes in inflammatory and performance responses following a soccer game. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 18(5), 423-431.
- Jeong, T., Reilly, T., Morton, J., Bae, S., y Drust, B. (2011). Quantification of the physiological loading of one week of “pre-season” and one week of “in-season” training in professional soccer players. *Journal of Sports Sciences*, 29(11), 1161-1166.
- Kiviniemi, A., Hautala, A., Kinnunen, H., y Tulppo, M. (2007). Endurance training guided individually by daily heart rate variability measurements. *European Journal of Applied Physiology*, 101(6), 743-51.
- Knicker, A., Renshaw, I., Oldham, A., y Cairns, S. (2011). Interactive processes link the multiple symptoms of fatigue in sport competition. *Sports Medicine*, 41(4), 307-28.

- Krejčí, J., Botek, M., y McKune, A. (2018). Stabilization period before capturing an ultra-short vagal index can be shortened to 60 s in endurance athletes and to 90 s in university students. *Plos One* 13 (10): e0205115-e0205115. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205115>.
- Krustrup, P., Mohr, M., Steensberg, A., Bencke, J., Kjaer, M., y Bangsbo, J. (2006). Muscle and blood metabolites during a soccer game: implications for sprint performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 38 (6), 1165-74.
- Krustrup, P., Ortenblad, N., Nielsen, J., Nybo, L., Gunnarsson, T., Iaia, M., Madsen, K., Stephens, F., Greenhaff, P., y Bangsbo, J. (2011). Maximal voluntary contraction force, SR function and glycogen resynthesis during the first 72 h after a high-level competitive soccer game. *European Journal of Applied Physiology*, 111(12), 2987-95.
- La Rovere, T., Bigger, T., Marcus, I., Mortara, A., y Schwartz, P. (1998). Baroreflex sensitivity and heart-rate variability in prediction of total cardiac mortality after myocardial infarction. *Lancet* 351, (9101), 478.
- Lamberts, R., Rietjens, G., Tjink, H., Noakes, T., y Lambert, M. (2010). Measuring submaximal performance parameters to monitor fatigue and predict cycling performance: a case study of a world-class cyclo-cross cyclist. *European Journal of Applied Physiology*, 108 (1), 183-90.
- Leeder, J., Glaister, M., Pizzoferrato, K., Dawson, J., y Pedlar, C. (2012). Sleep duration and quality in elite athletes measured using wristwatch actigraphy. *Journal of Sports Sciences*, 30(6), 541–545
- Le Meur, Y., Pichon, A., Schaal, K., Schmitt, L., Louis, J., Gueneron, J., Hausswirth, C. (2013). Evidence of parasympathetic hyperactivity in functionally overreached athletes. *Medicine & Science in Sports and Exercise*, 45(11), 2061–2071.
- Little T., y Williams A. (2007). Measures of exercise intensity during soccer training drills with professional soccer players. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 21(2), 367-71.
- Lorist, M., Boksem, M., y Ridderinkhof, W. (2005). Impaired cognitive control and reduced cingulate activity during mental fatigue. *Cognitive Brain Research*, 24(2), 199-205.
- Los Arcos, A., Mendez-Villanueva, A., y Martínez, R. (2017). In-season training periodization of professional soccer players. *Biology of Sport*, 34, 149-55.

- Lucía, A., Hoyos, J., Pérez, M., y Chicharro, J. (2000). Heart rate and performance parameters in elite cyclists: a longitudinal study. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32(10), 1777-82.
- Macor, F., Fagard, F., y Amery, A. (1996). Power spectral analysis of RR interval and blood pressure short-term variability at rest and during dynamic exercise: comparison between cyclists and controls. *International Journal of Sports Medicine*, 17(3), 175-81.
- Magalhães, J., Rebelo, A., Oliveira, E., Silva, J. R., Marques, F., y Ascensão, A. (2010). Impact of Loughborough intermittent shuttle Test versus soccer match on physiological, biochemical and neuromuscular parameters. *European Journal of Applied Physiology*, 108(1), 39–48.
- Malone, J., Di Michele, R., Morgans, R., Burgess, D., Morton, J., y Drust, B.. (2015). Seasonal training-load quantification in elite English premier league soccer players. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 10(4): 489-97.
- Mateo, M., Blasco-Lafarga, C., Martínez-Navarro, I., Guzmán, J. F., y Zabala, M. (2012). Heart rate variability and pre-competitive anxiety in BMX discipline. *European Journal of Applied Physiology*, 112(1), 113–123.
- Matveyev, L. P. (1977). Periodización del entrenamiento deportivo. Madrid. Instituto Nacional de Educación Física.
- Mazon, J, Gastaldi, A., Di Sacco, T., Cozza, I., Dutra, S., y Souza, Z. (2013). Effects of training periodization on cardiac autonomic modulation and endogenous stress markers in volleyball players. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 23(1), 114-20.
- Meeusen R, Duclos M, Foster C, Fry A, Gleeson M, Nieman D, y cols. (2013). Prevention, diagnosis, and treatment of the overtraining syndrome: joint consensus statement of the European College of Sport Science and the American College of Sports Medicine. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 45(1), 186–205
- Minett, G., y Duffield, R. (2014). Is recovery driven by central or peripheral factors? A role for the brain in recovery following intermittent-sprint exercise. *Frontiers in Physiology*, 5, 24-24.

- Moalla, W., Fessi, M., Farhat, F., Nouira, S., Wong, D., y Dupont, G. (2016). Relationship between daily training load and psychometric status of professional soccer players. *Research in Sports Medicine*, 24(4), 387-94.
- Mohr, M., Krstrup, P., y Bangsbo, J. (2003). Match performance of high-standard soccer players with special reference to development of fatigue. *Journal of Sports Sciences*, 21(7), 519.
- Mohr, M., Krstrup, P., y Bangsbo, J. (2005). Fatigue in soccer: A brief review. *Journal of Sports Sciences*, 23(6), 593-99.
- Mohr, M., Draganidis, D., Chatzinikolaou, A., Barbero, J., Castagna, C., Douroudos, I., Avloniti, A. (2016). Muscle damage, inflammatory, immune and performance responses to three football games in 1 week in competitive male players. *European Journal of Applied Physiology*, 116(1), 179-93.
- Munoz, M. L., van Roon, A., Riese, H., Thio, C., Oostenbroek, E., Westrik, I., Snieder, H. (2015). Validity of (Ultra-)Short Recordings for Heart Rate Variability Measurements. *Plos One*, 10(9), e0138921. doi:10.1371/journal.pone.0138921
- Nakamura, F., Flatt, A., Pereira, L., Campillo, R., Loturco, I., y Esco, M. (2015). Ultra-short-term heart rate variability is sensitive to training effects in team sports players. *Journal of Sports Science & Medicine*, 14(3), 602-5.
- Nakamura, F., Pereira, L., Abad, C., Franchini, E., y Loturco, I. (2016). Cardiac autonomic and neuromuscular responses during a karate training camp before the 2015 Pan American games: A Case Study with the brazilian national team. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 11(6), 833-37.
- Naranjo, J., De la Cruz, B., Sarabia, E., De Hoyo, M., y Domínguez-Cobo, S. (2015a). Heart rate variability: a follow-up in elite soccer players throughout the season. *International Journal of Sports Medicine*, 36(11), 881-86.
- Naranjo, J., de la Cruz Torres, B., Sarabia E., De Hoyo, M., y Domínguez, S. (2015b). Two new indexes for the assessment of autonomic balance in elite soccer players. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 10(4), 452-57.
- Nédélec, M., McCall, A., Carling, C., Legall, F., Berthoin, S., y Dupont, G. (2012). Recovery in soccer: part I post-match fatigue and time course of recovery. *Sports Medicine* 42(12), 997-1015.

- Nédélec, M., McCall, A., Carling, C., Legall, F., Berthoin, S., y Dupont, G. (2013). Physical performance and subjective ratings after a soccer specific exercise simulation: comparision of natural grass versus artificial turf. *Journal of Sports Science* 31(5),529-36.
- Nédélec, M., McCall, A., Carling, C., Legall, F., Berthoin, S., y Dupont, G. (2014). The influence of soccer playing actions on the recovery kinetics after a soccer match. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 28(6), 1517-1523.
- Nédélec, M., Halson, S., Delecroix, B., Abaidia, A.-E., Ahmaidi, S., y Dupont, G. (2015). Sleep hygiene and recovery strategies in elite soccer players. *Sports Medicine*, 45(11), 1547–1559.
- Nielsen, B., de Paoli, F., y Overgaard, K. (2001). Protective effects of lactic acid on force production in rat skeletal muscle. *The Journal of Physiology*, 536, 161-66.
- Nunan, D., Donovan, G., Jakovljevic, D., Hodges, L., Sandercock, G., y Brodie, D. (2009). Validity and reliability of short-term heart-rate variability from the Polar S810. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 41(1), 243-50.
- Nybo, L., y Nielsen, B. (2001). Hyperthermia and central fatigue during prolonged exercise in humans. *Journal of Applied Physiology*, 91(3), 1055-60.
- Oliveira R, Brito JP, Martins A, Mendes B, Marinho DA, Ferraz R, y cols., In-season internal and external training load quantification of an elite European soccer team. *Plos One* 14(4):e0209393. doi: 10.1371/journal.pone.0209393.
- Pagani, M., Lombardi, F., Guzzetti, S., Rimoldi, O., Furlan, R., Pizzinelli, P., Sandrone, G. (1986). Power spectral analysis of heart rate and arterial pressure variabilities as a marker of sympatho-vagal interaction in man and conscious dog. *Circulation Research*, 59(2), 178-93.
- Paul, D., Bradley, S., y Nassis, G. (2015). Factors Affecting Match Running Performance of Elite Soccer Players: Shedding Some Light on the Complexity. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 10(4), 516–519
- Penttilä, J., Helminen, A., Jartti, T., Kuusela, H., Huikuri, H., Tulppo, M., Coffeng, R., y Scheinin, H. (2001). Time domain, geometrical and frequency domain analysis of cardiac vagal outflow: effects of various respiratory patterns. *Clinical Physiology* 21(3), 365-76.

- Pereira, L., Flatt, A., Campillo, R., Loturco, I., y Nakamura, F. (2016). Assessing shortened field-based heart-rate-variability-data acquisition in team-sport athletes. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 11(2), 154-58.
- Pichon, A., Bisschop, C., Roulaud, M., Denjean, A., y Papelier, Y. (2004). Spectral analysis of heart rate variability during exercise in trained subjects. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 36(10), 1702-1708.
- Pichot V., Roche, F., Gaspoz, J., Enjolras, F., Antoniadis, A., Minini, P., Costes, F., Busso, T., Lacour, J., y Barthélémy, J. (2000). Relation between heart rate variability and training load in middle-distance runners. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 32(10), 1729-1736.
- Plews D., Laursen, P., Kilding, A., y Buchheit, M. (2012). Heart rate variability in elite triathletes, is variation in variability the key to effective training? A case comparison. *European Journal of Applied Physiology* 112(11), 3729-3741.
- Plews, D., Laursen, P., Stanley, J., Kilding, A., y Buchheit, M. (2013). Training adaptation and heart rate variability in elite endurance athletes: opening the door to effective monitoring. *Sports Medicine*, 43(9), 773-81.
- Plews, D., Laursen, P., Kilding, A., y Buchheit, M. (2014a). Heart-rate variability and training-intensity distribution in elite rowers. *International Journal of Sports Physiology & Performance* 9(6): 1026-32.
- Plews, D., Laursen, P., Le Meur, Y., Hausswirth, C., Kilding, A., y Buchheit, M. (2014b). Monitoring training with heart rate-variability: how much compliance is needed for valid assessment? *International Journal of Sports Physiology & Performance* 9(5), 783-90.
- Plews, D., Laursen, P., y Buchheit, M. (2017a). Day-to-day heart rate variability (HRV) recordings in world champion rowers: appreciating unique athlete characteristics. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 12(5), 697–703.
- Plews, D., Scott, B., Altini, M., Wood, M., Kilding, A., y Laursen, P. (2017b). Comparison of heart-rate-variability recording with smartphone photoplethysmography, Polar H7 chest strap, and electrocardiography. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 12(10), 1324-28

- Pomeranz, B., Macaulay, R., Caudill, M., Kutz, I., Adam, D., Gordon, D., Kilborn, K. (1985). Assessment of autonomic function in humans by heart rate spectral analysis. *The American Journal of Physiology*, 248(1 Pt 2), H151–H153
- Portier, H., Louisy, F., Laude, D., Berthelot, M., Guézennec, C. (2001). Intense endurance training on heart rate and blood pressure variability in runners. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(7), 1120-25.
- Proietti, R., Di Fronso, S., Pereira, L., Bortoli, L., y Robazza, C. (2017). Heart rate variability discriminates competitive levels in professional soccer players. *Journal of Strength & Conditioning Research* 31(6), 1719-25.
- Rampinini, E., Coutts, A., Castagna, C., Sassi, R., y Impellizzeri, F. (2007). Variation in top level soccer match performance. *International Journal of Sports Medicine*, 28(12), 1018-24.
- Rampinini, E., Bosio, A., Ferraresi, I., Petruolo, A., Morelli, A., y Sassi, A. (2011). Match-related fatigue in soccer players. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43(11), 2161-70.
- Raposo, A. (2000). *Planificación y organización del entrenamiento deportivo*. Barcelona, España: Paidotribo.
- Ravé, G., y Fortrat, J. (2016). Heart rate variability in the standing position reflects training adaptation in professional soccer players. *European Journal of Applied Physiology*, 116(8), 1575-82.
- Rave, G., Fortrat, J., Dawson, B., Carre, F., Dupont, G., Saeidi, A., Boullosa, D., y Zouhal, H. (2018). Heart rate recovery and heart rate variability: use and relevance in European professional soccer. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 18(1), 168-83.
- Reilly, T. (1994). Physiological aspects of soccer. *Biology of Sport* 11(1), 3-20.
- Reilly, T. (1997). Energetics of high-intensity exercise (soccer) with particular reference to fatigue. *Journal of Sports Sciences*, 15(3), 257-263.
- Risk, M., Bril, V., Broadbridge, C., y Cohen, A. (2001). Heart rate variability measurement in diabetic neuropathy: review of methods. *Diabetes Technology & Therapeutics*, 3(1), 63-76.

- Rodas, G., Pedret, C., y Ramos, J. (2008). Variabilidad de la frecuencia cardíaca: concepto, medidas y relación con aspectos clínicos. *Archivos de Medicina del Deporte*, XXV(123), 41-47.
- Saboul, D., Balducci, P., Millet, G., Pialoux, V., y Hautier, C. (2016). A pilot study on quantification of training load: The use of HRV in training practice. *European Journal of Sport Science*, 16(2), 172-81.
- Sacknoff, D., Gleim, G., Stachenfeld, N., y Coplan, N. (1994). Effect of athletic training on heart rate variability. *American Heart Journal*, 127(5), 1275-78.
- Saw, A., Luana, C., y Gatin, P. (2016). Monitoring the athlete training response: subjective self-reported measures trump commonly used objective measures: a systematic review. *British Journal of Sports Medicine*, 50(5), 281-91.
- Sayers, B. (1973). Analysis of heart rate variability. *Ergonomics*, 16(1), 17-32.
- Schmitt, L., Regnard, J., Desmarests, M., Mauny, F., Mourot, L., Fouillot, J., Coulmy, N., y Millet, G. (2013). Fatigue shifts and scatters heart rate variability in elite endurance athletes. *Plos One* 8(8): e71588-e71588.
- Schmitt, L., Regnard, J., Parmentier, A., Mauny, F., Mourot, L., Coulmy, N., y Millet, G. (2015). Typology of “fatigue” by heart rate variability analysis in elite nordic-skiers. *International Journal of Sports Medicine*, 36(12), 999-1007.
- Schneider, C., Hanakam, F., y Wiewelhove, T. (2018). Heart rate monitoring in team sports. A conceptual framework for contextualizing heart rate measures for training and recovery prescription. *Frontiers in Psychology*, 9(639).
- Schwellnus, M., Soligard, T., Alonso, J., Bahr, R., Clarsen, B., Dijkstra, H., Gabbett, T. (2016). How much is too much? (Part 2) International Olympic Committee consensus statement on load in sport and risk of illness. *British Journal of Sports Medicine*, 50(17), 1043-52.
- Scott, B., Lockie, R., Knight, T., Clark, A., y De Jonge, X. (2013). A comparison of methods to quantify the in-season training load of professional soccer players. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 8(2), 195-202.
- Semjon, M., Botek, M., Svozil, Z., y McKune, A. (2016). Positional differences in the cardiorespiratory, autonomic, and somatic profiles of professional soccer players. *Acta Gymnica*, 46(2), 90-96.

- Shin, K., Minamitani, H., Onishi, S., Yamazaki, H., y Lee, M. (1995). The power spectral analysis of heart rate variability in athletes during dynamic exercise Part I. *Clinical Cardiology*, 18(10), 583-86.
- Silva, V., Oliveira, N., Silveira, H., Mello, R., y Deslandes, A. (2015). Heart rate variability indexes as a marker of chronic adaptation in athletes: a systematic review. *Annals of Noninvasive Electrocardiology*, 20(2), 108-18.
- Smith, M., Thompson, C., Marcora, S., Skorski, S., Meyer, T., y Coutts, A. (2018). Mental fatigue and soccer: current knowledge and future directions. *Sports Medicine*, 48(7), 1525-32.
- Smith, M., Zeuwts, L., Lenoir, M., Hens, N., De Jong, L., y Coutts, A. (2016). Mental fatigue impairs soccer specific decision-making skill. *Journal of Sports Sciences*, 34(14), 1297-1304.
- Spallone, V., Ziegler, D., Freeman, R., Bernardi, L., Frontoni, S., Pop-Busui, R., Stevens, M. (2011). Cardiovascular autonomic neuropathy in diabetes: clinical impact, assessment, diagnosis, and management. *Diabetes/Metabolism Research & Reviews*, 27(7), 639-53.
- Sparks, M., Coetzee, B., y Gabbett, T. (2016). Variations in high-intensity running and fatigue during semi-professional soccer matches. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 16, 122-32.
- Stanley, J., Peake, J., y Buchheit, M. (2013a). Consecutive days of cold-water immersion: effects on cycling performance and heart rate variability. *European Journal of Applied Physiology*, 113(2), 371-84.
- Stanley, J., Peake, J., y Buchheit, M. (2013b). Cardiac parasympathetic reactivation following exercise: implications for training prescription. *Sports Medicine*, 43(12), 1259-77.
- Task Force (1996). Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. *Circulation*, 93(5), 1043–1065.
- Terrados, N., Calleja, J., y Xelling, X. (2010). Bases fisiológicas comunes para deportes de equipo. *Revista Andaluza de Medicina del deporte* 4(2), 84-88.
- Thorpe, R., Strudwick, A., Buchheit, M., Atkinson, G., Drust, B., y Gregson, W. (2015). Monitoring fatigue during the in-season competitive phase in elite soccer players. *International Journal of Sports Physiology&Performance*, 10(8), 958-64.

- Thorpe, R., Strudwick, A., Buchheit, M., Atkinson, G., Drust, B., y Gregson, W. (2016). The tracking of morning fatigue status across in-season training weeks in elite soccer players. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 11(7), 947–952
- Uusitalo, A., Uusitalo, L., y Rusko, H. (1998). Exhaustive endurance training for 6-9 weeks did not induce changes in intrinsic heart rate and cardiac autonomic modulation in female athletes. *International Journal of Sports Medicine*, 19(8), 532-40.
- Vilamitjana, J., Lentini, N., y Pérez, M. (2014). Heart rate variability as biomarker of training load in professional soccer players. *Medicine & Science in Sports and Exercise*, 46(5), 841-50.
- Waldron, M., y Highton, J. (2014). Fatigue and pacing in high-intensity intermittent team sport: an update. *Sports Medicine*, 44(12), 1645-58.
- Weir, P., Beck, T., Cramer, J., y Housh, T. (2006). Is fatigue all in your head? A critical review of the central governor model. *British Journal of Sports Medicine*, 40(7), 573-86.
- Wolf, M., Varigos, G., y Hunt, D. (1978). Sinus arrhythmia in acute myocardial infarction. *Medical Journal Australia*, 2, 52-53.
- World Medical Association (2013) World medical association declaration of Helsinki ethical principles for medical research involving human subjects. *Journal of the American Medical Association*, 310,2191-2194.
- Yamamoto, Y., Hughson, R., y Peterson, J. (1991). Autonomic control of heart rate during exercise studied by heart rate variability spectral analysis. *Journal of Applied Physiology*, 71(3), 1136-42.

8. Anexos

8.1 Consentimiento informado del jugador para la utilización de datos

Identificación y descripción del procedimiento

Se solicita su autorización para utilizar los datos y de la evolución del tratamiento que se le ha realizado en y que se hallan recogidos en su historia clínica, para el trabajo de investigación:.....
....., cuya finalidad es evaluar
.....
.....

Objetivo

Los resultados de este proyecto de investigación pueden contribuir a la mejora en el diagnóstico y tratamiento del entrenamiento. Los datos de su historia clínica serán custodiados en los términos previstos en la Ley 14/2007, de 3 de julio, y en el Real Decreto 1716/2011, de 18 de noviembre.

Beneficios esperados

No percibirá ninguna compensación económica o de otro tipo por participar en esta investigación. Sin embargo, si las investigaciones que se pudieran realizar tuvieran éxito, podrían ayudar en el futuro a la mejora del proceso de entrenamiento. La información no será vendida o distribuida a terceros con fines comerciales.

Consecuencias previsibles de su no participación y derecho de revocación del consentimiento

La participación en este proyecto de investigación es voluntaria y puede cancelarse en cualquier momento. Si rechaza participar, no habrá consecuencias negativas para usted. Si se retira del proyecto, puede decidir si los datos utilizados hasta ese momento, deben borrarse o si se pueden seguir utilizando tras haberlos convertido en anónimos (p. ej., eliminando los datos de la información identificativa, incluido el código, para que resulte imposible volver a identificarlos).

Pueden solicitar a los investigadores que les proporcionen los datos almacenados en el registro y que corrijan los errores en ellos en cualquier momento.

Protección de datos personales y confidencialidad

Sus datos personales y de salud serán incorporados a un Fichero de datos para su tratamiento, de acuerdo con lo estipulado en la Ley Orgánica 15/1999 de Protección de datos de Carácter Personal, de 13 de diciembre (LOPD). El titular de los datos personales podrá ejercitar los derechos de acceso, rectificación, cancelación y oposición al tratamiento de datos de carácter personal, y de revocación del consentimiento, en los términos previstos en la normativa aplicable.

Información de contacto

Si tienen alguna pregunta sobre este proyecto de investigación, puede consultar en cualquier momento al Investigador:

Si deciden participar en este proyecto, rellenen y firmen el formulario de consentimiento que aparece a continuación.

8.2. Ejemplar para el jugador

DECLARACIÓN DE CONSENTIMIENTO

D.....de.....
años de edad, con domicilio en
DNI.....

DECLARO

- Que he leído la hoja de información que se me ha entregado.
- Que he comprendido las explicaciones que se me han facilitado.
- Que he podido realizar observaciones y me han sido aclaradas las dudas que he planteado.
- Que puedo revocar el consentimiento en cualquier momento sin tener que dar explicaciones y sin que esto repercuta en mis cuidados médicos.
- Que de forma libre y voluntaria cedo los datos que se hallan recogidos en mi historia clínica para el estudio que se me ha propuesto

- Que puedo incluir restricciones sobre el uso de las mismas.

Consiento

Que se utilicen los datos que se hallan recopilados en mi historia clínica para el mencionado estudio.

Que el investigador pueda acceder a mis datos en la medida en que sea necesario y manteniendo siempre su confidencialidad.

Que el personal del centro me contacte en el futuro en caso de que se estime oportuno añadir nuevos datos a los recogidos y/o tomar nuevas muestras. ☐ Sí ☐ No

☐ Deseo incluir la siguiente restricción al uso de mis datos:

.....

.....

Fdo.: D.

En a de de 20.....

Si el sujeto del estudio es un adolescente capaz intelectual y emocionalmente de entre 12 y 16 años debe de ser oída su opinión y autorizar su participación en el estudio firmando también este consentimiento. Cuando se trate de menores no incapaces ni incapacitados, pero emancipados o con 16 años cumplidos, no cabe prestar el consentimiento por representación y será el propio sujeto del estudio quien firmará el consentimiento (Ley 41/2002).

Declaración Investigador:

He informado debidamente al donante

Fdo.: DNI

En a de de 20...

Revocación

Fdo.: D./Dña

Revoco el consentimiento cedido para la utilización de mis datos para el estudio propuesto

En a de de 20.....

8.3. Ejemplar para el investigador

Declaración de consentimiento

D./.....de.....

años de edad , con domicilio en DNI

DECLARO

- Que he leído la hoja de información que se me ha entregado.
- Que he comprendido las explicaciones que se me han facilitado.
- Que he podido realizar observaciones y me han sido aclaradas las dudas que he planteado.
- Que puedo revocar el consentimiento en cualquier momento sin tener que dar explicaciones y sin que esto repercuta en mis cuidados médicos.
- Que de forma libre y voluntaria cedo los datos que se hallan recogidos en mi historia clínica para el estudio que se me ha propuesto
- Que puedo incluir restricciones sobre el uso de las mismas.

Consiento

Que se utilicen los datos que se hallan recopilados en mi historia clínica para el mencionado estudio.

Que el investigador pueda acceder a mis datos en la medida en que sea necesario y manteniendo siempre su confidencialidad.

Que el personal del centro me contacte en el futuro en caso de que se estime oportuno añadir nuevos datos a los recogidos y/o tomar nuevas muestras. ☐ Sí ☐

No

☐ Deseo incluir la siguiente restricción al uso de mis datos:

.....
.....

Fdo.: D./Dña

En a..... de de 20.....

Si el sujeto del estudio es un adolescente capaz intelectual y emocionalmente de entre 12 y 16 años debe de ser oída su opinión y autorizar su participación en el estudio

firmando también este consentimiento. Cuando se trate de menores no incapaces ni incapacitados, pero emancipados o con 16 años cumplidos, no cabe prestar el consentimiento por representación y será el propio sujeto del estudio quien firmará el consentimiento (Ley 41/2002).

Declaración del investigador:

He informado debidamente al donante

Fdo.: DNI

En a de de 20...

Revocación

Fdo.: D./Dña

Revoco el consentimiento cedido para la utilización de mis datos para el estudio propuesto

En a de de 20

